

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2007**

**Štěpánka MLEJNKOVÁ**

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta textilní

Katedra designu

Bakalářský studijní program:

oděvní návrhářství

Zaměření:

technologie a design

## **VLIV POZADÍ NA VJEM BAREVNÝCH ROZDÍLŮ**

### **INFLUENCE OF COLOUR BACKGROUND TO PERCEPTION OF COLOUR DIFFERENCES**

**Štěpánka MLEJNKOVÁ**

Vedoucí práce: Doc. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Konzultant: Ing. Martina Viková

Počet stran: 79

Počet příloh: 0

Počet obrázků: 65

Počet tabulek: 0

Počet modelů: 0

Jiné přílohy: 1 cd

Datum: 14.05. 2007

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním bakalářské práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé bakalářské práce.

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla až do jejich skutečné výše.

Datum: 14. 5. 2007

Podpis: .....

## **Poděkování**

Chtěla bych touto cestou poděkovat Doc. Ing. Michalu Vikovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení mé bakalářské práce. Bez jeho odborného vedení a podpory by tato práce vůbec nevznikla. Také bych chtěla poděkovat Ing. Martině Vikové za její odborné konzultace a pomoc při provádění praktických experimentů. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým nejbližším za podporu, trpělivost a dodávání pohody při studiu.

## **ANOTACE**

### **VLIV POZADÍ NA VJEM BAREVNÝCH ROZDÍLŮ**

Cílem této bakalářské práce je výzkum a praktické měření vlivu pozadí na vjem barevných rozdílů. V rámci práce bylo provedeno měření a vyhodnocení experimentu. V závěru práce jsou navrženy další možné postupy zkoumání dané problematiky.

### **INFLUENCE OF COLOUR BACKGROUND TO PERCEPTION OF COLOUR DIFFERENCES**

The Bachelor work consists of researches practical measurements and colour influences, and its differences of the perception of colour background. The practical measurements and evaluations were made. The new possibilities and next steps are offered at the end of this work.

Klíčová slova:

barva, barevný rozdíl, barevný kontrast, fotometrie, kolorimetrie, kalibrace

Key words:

colour, colour difference, colour contrast, photometry, colorimetry, calibration

Řešitel: Štěpánka MLEJNKOVÁ

Zpracovatel: TU v Liberci

Dokončeno: 2007

Počet stran: 79

Počet příloh: 0

Počet obrázků: 65

Počet tabulek: 0

Jiné přílohy: 1 cd

## Obsah:

1. Úvod.....	9
<i>Teoretická část .....</i>	<i>11</i>
2. Barva.....	11
2.1. Popis základních atribut barvy.....	11
2.1.1. Tón .....	11
2.1.2. Světlost.....	11
2.1.3. Čistota .....	12
2.2. Komplementární barvy .....	13
2.3. Simultánní barevný kontrast .....	14
2.3.1. Světlost.....	15
2.3.2. Čistota .....	16
2.3.3. Tón .....	17
2.4. Kontrast hran a vzorů.....	18
2.5. Teorie barevného vnímání .....	20
2.5.1. Barevné vidění na úrovni sítnice .....	21
2.5.2. Barevné vidění na úrovni kůry.....	23
2.5.3. Barvoslepost.....	24
2.5.4. Druhy barvosleposti .....	25
2.5.5. Diagnostika barvosleposti.....	26
3. Fotometrie.....	27
3.1. Úvod do fotometrie .....	27
3.2. Vizuální fotometrie .....	28
3.2.1. Fotometrické pole .....	29
3.2.2. Faktory ovlivňující přesnost vizuálních fotometrických měření .....	29
1. Poloha obrazu fotometrického pole na sítnici oka pozorovatele .....	30
2. Velikost a tvar fotometrického pole.....	31
3. Jas fotometrického pole a jeho vliv na přesnost měření .....	32
4. Spektrální zabarvení světla ve srovnávaných fotometrických polích.....	33
5. Adaptace oka pozorovatele a jas pozadí v okolí fotometrického pole .....	33
6. Výběr pozorovatelů.....	33
4. Kolorimetrie.....	34
4.1. CIE systém.....	35
4.2. L*, a*, b* systém .....	40

4.2.1. Barevná difference v systému CIE L*, a*, b* .....	42
4.2.2. Rovnice barevných diferencí .....	43
5. Kalibrace monitoru .....	47
5.1. Kalibrace a zobrazení barev různými zobrazovacími systémy.....	47
5.1.1. Kalibrace sondy .....	48
5.1.2. Kalibrace monitoru .....	49
5.1.3. Kalibrace monitoru CRT .....	50
5.1.4. Kalibrace panelu LCD .....	51
5.1.5. Kalibrace Skenerů.....	51
5.1.6. Kalibrace digitálních fotoaparátů a kamer.....	52
<i>Experimentální část</i> .....	54
6. Popis experimentu.....	54
6.1. Popis pracoviště .....	54
6.2. Použité zařízení.....	54
6.2.1. Kalibrace použitého zařízení .....	55
6.3. Popis měřených pozorovatelů.....	56
6.4. Průběh experimentu .....	59
7. Výsledky experimentu .....	61
7.1. Testování citlivosti skupiny pozorovatelů .....	61
7.1.1. Znázornění výsledků pomocí odchylek od nominálních .....	62
7.1.2. MacAdamova hraniční citlivost.....	66
7.2. Testování vlivů pozadí na vjem barevných rozdílů .....	67
7.2.1. Porovnání naměřených výsledků .....	69
7.2.2. Porovnání experimentálních dat a rovnic pro výpočet barevných odchylek .....	74
8. Studie dalšího postupu .....	76
9. Závěr .....	77
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY: .....	79

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

apod. – a podobně

atd. – a tak dále

B, b, blue – modrá

C, chroma – čistota

CIE - Commission International de l'Eclairage

cd – kandela

č. – číslo

G, g, green – zelená

H, hue – odstín

IT – informační technika

ks – kusy

L, lightness – světlost

$L^*a^*b^*$  - kolorimetrické souřadnice v soustavě CIELAB

např. – například

obr. – obrázek

R, r, red – červená

resp. – respektive

tab. – tabulka

tj. – to jest

tzv. – takzvaně

vs. – versus

X, Y, Z – trichromatická složka

Y, y, yellow - žlutá

zk. – zkouška

$\Delta E^*$  – celkový barevný rozdíl



# 1. Úvod

Před více než sto lety vznikla psychofyzika, která si kladla za cíl kvantitativně hodnotit různé psychické jevy. Největší úsilí bylo věnováno měření počitků, které se v té době zdály být současně nejjednoduššími a hlavními elementy psychického života. Senzorická psychofyzika, která určovala vztahy mezi velikostí podnětu a jím vyvolaného počitku, zůstává dosud jedním ze základních odvětví psychologie vnímání. Zkoumání psychofyzikálních vztahů je zajímavé pro pochopení toho jakým způsobem se informace o předmětu přetváří našimi percepčními systémy.

Ústředním psychofyzikálním poznatkem je skutečnost, že přesnost smyslových orgánů není nekonečná, takže existuje vždy množství podnětů, jejichž energie ke vzniku počitku nestačí. Z celé škály možných podnětů se vnímají jen ty, jejichž velikost je mezích poměrně úzké oblasti, tradičně nazývané oblastí pravých počitků. Dolní mez pravých počitků, určená minimální velikostí podnětu vyvolávajícího již počitek, se nazývá dolním absolutním prahem. Pro některé charakteristiky podnětu, jako je například světelný signál, je za horní hranici absolutního prahu pokládána velikost podnětu, který již přestává počitek vyvolávat, resp. úroveň podnětu začínající vyvolávat počitek bolesti – pak se mluví o prahu bolesti.

Absolutní prahy charakterizují citlivost organismu k danému druhu stimulace. Čím nižší je absolutní práh, tím slabší podněty mohou počitky vyvolávat. Proto se obvykle soudí, že velikost absolutní citlivosti je v převrácené hodnotě vůči dolnímu absolutnímu prahu. Absolutní citlivost člověka ve vztahu k světlu je neobyčejně vysoká. Bylo zjištěno [1], že zrakové počitky vznikají již při dopadu několika kvant (2-8) na sítnici. Pro bližší představu to znamená, že člověk je schopen vnímat světlo svíčky na vzdálenost 27 km!

Kromě úkolu zjistit velmi slabé signály, vystává před organizmem úkol rozlišit podněty podle jejich síly a kvality. Nejmenší rozdíl mezi dvěma podněty, kterého si může pozorovatel všimnout, se nazývá relativní práh. Určení relativního prahu, resp. citlivosti má někdy větší význam než určení absolutního prahu. Typickou ukázkou je například citlivost na barevné rozdíly.

Ve 40-tých letech dvacátého století publikoval MacAdam hodnoty hraniční citlivosti pozorovatele vůči barevným rozdílům [2]. Tato práce byla provedena v oboru barevných světél. Vzhledem k tomu, že v textilním průmyslu pracujeme s tzv.

barevnými povrchy, je důležité ověřit velikost relativního prahu vůči vnímání barevných rozdílů i u textilií (barevné povrchy). Hlavním problémem v oblasti barevných povrchů je skutečnost, že pozorovatelé při posuzování barevných rozdílů mají k dispozici individuální barevné vzorky, u kterých nelze plynule měnit odstín, čistotu nebo jas, jako je tomu v případě barevných světél. Výsledkem jsou tak diskrétní data, jejich statistické zpracování je značně složité.

Vzhledem k tomu, že v současné době jsou k dispozici nové typy kvalitních počítačových monitorů, nabízí se možnost simulovat barevný vzhled textilie a současně plynule měnit její barvu. Z tohoto důvodu je tato diplomová práce zaměřena na studium hraniční citlivosti pozorovatelů vůči barevným rozdílům u virtuálních vzorků textilií a vlivu blízkého okolí – pozadí na hraniční citlivost. Jelikož se jedná o prvotní studii, charakter textilních vzorků je simulován pomocí dvojic barevných obdélníků bez simulované textury textilie.

## *Teoretická část*

## **2. Barva**

### **2.1. Popis základních atribut barvy**

#### **2.1.1. Tón**

Tón je nejznámější atribut barvy: vlastnost, kterou identifikujeme za pomoci známých jmen barev jako například červená, zelená, žlutá nebo modrá. Příklad rozdílů v tónu je na obrázku 1, na kterém se mění tón barvy, ale čistota a světlost se nemění.



*Obr. 1 Změna v tónu, čistota a světlost jsou stejné*

Naše vnímání tónu je obvykle určeno průměrnou nebo dominantní vlnovou délkou ve světle, které vidíme. Tón se ztotožní s dominující "průměrnou" vlnovou délkou světla. Tóny mohou být pouze spektrální barvy (barvy duhy), a směsi spektrální červené a modré (jako jsou azurová a purpurová), které se objeví v barevném kruhu. Nesyté barvy jako "šedá", "hnědá", "olivová" atd. nejsou spektrálními, ale jsou určitými variacemi spektrálních barev. Například "hnědou" lze definovat jako lomený oranžový tón.

#### **2.1.2. Světlost**

Druhý atribut barvy je také všeobecně známý: světlost nebo tmavost barvy. Umělci ho obvykle nazývají valér. Světlost je celkové množství světla dopadajícího do oka ze všech částí viditelného spektra, čím je světlo intenzivnější, tím je barva světlejší. Příklad rozdílů ve světlosti je na obrázku 2, na kterém jsou rozdíly ve světlosti barvy, tón a čistota zůstávají stejné.



*Obr. 2 Změna ve světlosti, tón a čistota jsou stejné*

### 2.1.3. Čistota

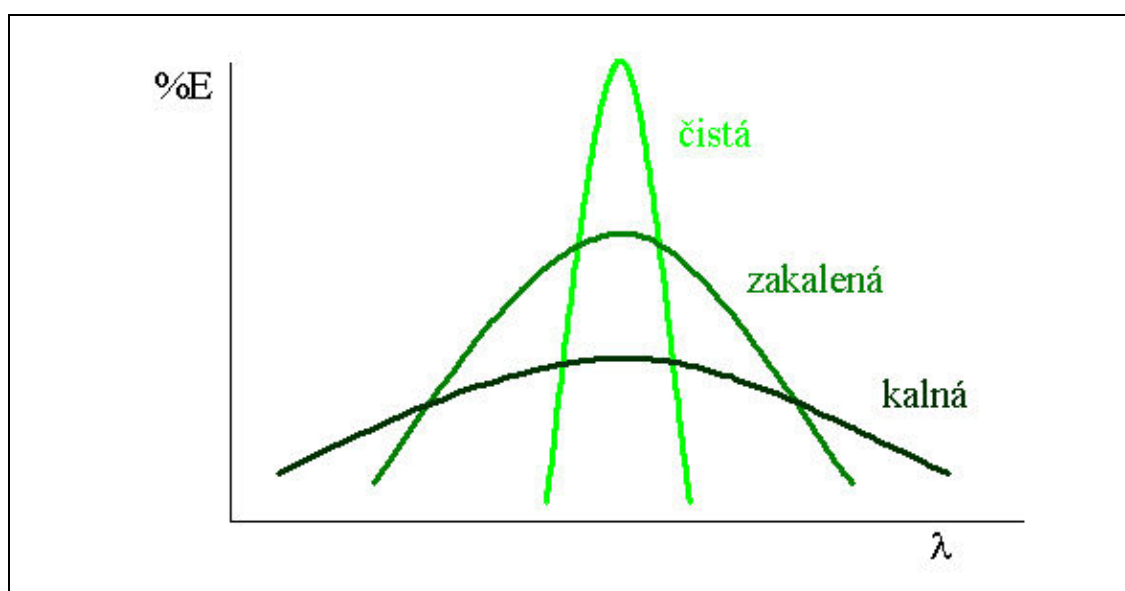
Čistota, sytost neboli chroma je intenzita tónu, bez ohledu na to, jak je světlý nebo tmavý. Intenzivní nebo hodně sytá barva vypadá velmi jasná nebo koncentrovaná, takovou jakou ji najdeme například v duze, zatímco barva s nízkou čistotou vypadá mdle, šedavě, nebo zašle. Sytost také označuje spektrální čistotu světla. Příklad na obrázku 3 ukazuje změny sytosti šarlatově červené, tón a světlost se nemění.



Obr. 3 Změna ve čistotě, tón a světlost jsou stejné

Teoreticky by barva jedné vlnové délky nebo monospektrální světlo byly nejsytějšími možnými fyzikálními stimuly. Všechny přidané vlnové délky (jiného tónu nebo "bílého" světla) budou barvu zesvětlovat, ale současně ji budou snižovat sytost.

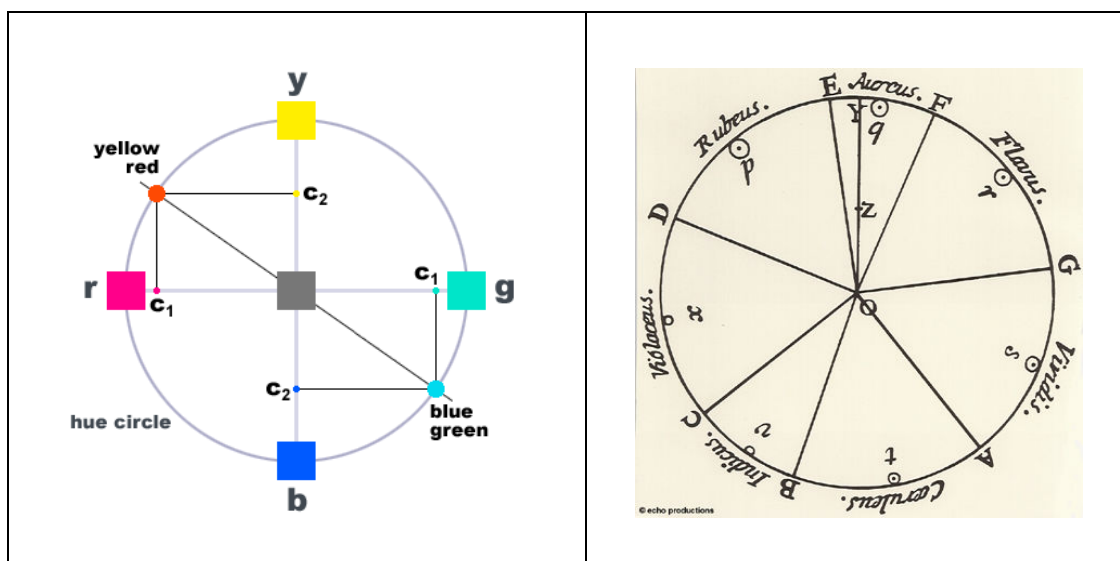
Barvy s nízkou sytostí se míchají z mnoha odlišných vlnových délek světla, takže barva nemá úzké a přesné umístění ve viditelném spektru. Místo toho, jak ukazuje obrázek 4, tyto hodně odlišné průměrné vlnové délky vytvoří plochý remisní profil, který se rovná šedé. A "šedá" může znamenat buď velmi šedou blízko bílé, nebo velmi tmavě šedou blízko černé, což závisí na světlosti barvy.



Obr. 4 Emisní spektra barev o různé čistotě

## 2.2. Komplementární barvy

Barevný kruh je jednou z možností jak studovat vztahy mezi barvami. Dříve byly barvy světla právě tak blízko nebo daleko od sebe navzájem v celé délce viditelného spektra. Nyní můžou být barvy naproti sobě na barevném kruhu. Newton byl první kdo upozoroval, že dvě vlnové délky světla naproti sobě v barevném kruhu viz obrázky 5 a 6, (například "indigo" a hluboká žlutá) namíchané ve správných poměrech, vytvoří skoro bílé světlo. Toto jsou barvy komplementární.



Obr. 5 Komplementární barvy

Obr. 6 Newtonův kruh

Oponentní kódování barev vytvoří dva nezávislé barevné kontrasty: červeno-zelený a žluto-modrý. Tyto barvy jsou na barevném kruhu zhruba naproti sobě. To naznačuje, že vztah komplementárních barev představuje důležitou stránkou účinku barev. Důkazem tohoto tvrzení je vznik negativního paobrazu. Pro většinu lidí jsou barvy v paobraze obvykle obrácené: zelená se změní v purpurovou, modrá ve žlutou, purpurová v zelenou a žlutá v modrou. Tyto iluzivní barvy jsou vizuálními doplňky k tónům v originálním obraze, které vznikají pod delším pohledu na tento obraz a následném pohledu na bílou plochu nebo zavřením očí.

Komplementární barvy jsou důsledkem oponentního kódování základních podnětů barevného vidění.

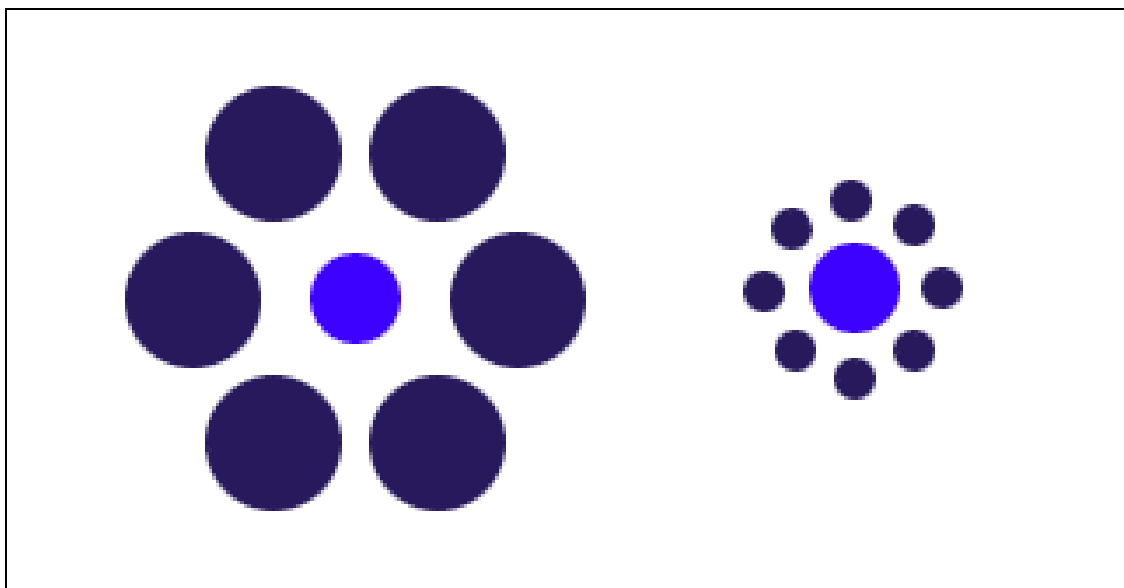
Běžná definice vizuálních komplementárních barev je, že tyto barvy jsou v kontrastujících polohách na r-g a y-b (obrázek 5) kontrastech. Oranžová (zakódovaná

vizuálním systémem jako (r+y+) je doplňkem modré (zakódované jako r-y-, nebo g+b+); středně zelená (r-y+) je doplňkem červenofialové (r+y-), žlutá (y+, rg=0) je doplňkem modrofialové (y- nebo b+, rg=0) atd. Tato logika je pouze techničtější verzí staré myšlenky, že komplementární barvy jsou polárně protilehlé. A staré estetické teorie dospěly k závěru, že tyto barevné páry tvoří nejsilnější vizuální napětí, a když jsou správně vyvážené, tvoří většinou uspokojující vizuální harmonii v barevném návrhu.

### 2.3. Simultánní barevný kontrast

Simultánní kontrast způsobuje barevnou změnu vzorku při změně pozadí.

Ukázka na obrázku 7 znázorňuje kontrastní změny v jednoduchém vzoru, kde je modrý kruh obklopen menšími kruhy, a vypadá tak větší, než když je obklopen většími kruhy.

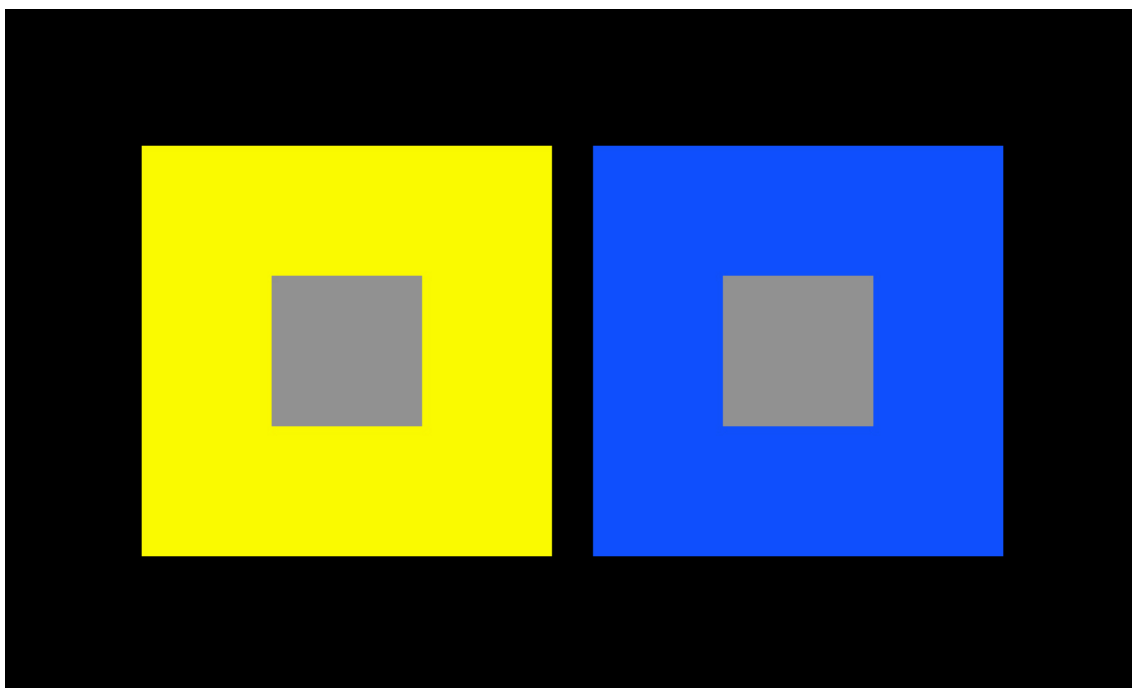


*Obr. 7 Kontrastní účinky ve vzhledu velikosti kruhu, oba středové kruhy jsou ve skutečnosti stejně velké*

Kontrastní účinky související s barvou: kontrasty se objevují, jsou-li barvy umístěny jedna vedle druhé a viděny ve stejném čase. Tyto simultánní barevné kontrasty jsou základem literatury o „barevné teorii“ a v mnoha vysvětleních klasických barevných kontrastů.

### 2.3.1. Světlost

Nejvlivnějším příkladem je zdánlivý posun ve světlosti identického středně světlého čtverečku, obklopeného barvu s tmavším nebo světlejším valérem. Jestliže obklopující barva je tmavší, středový čtvereček se bude jevit světlejší; jestliže ho naopak obklopuje barva světlejší, bude středový čtvereček vypadat tmavší, příklad vidíme na obrázku 8.



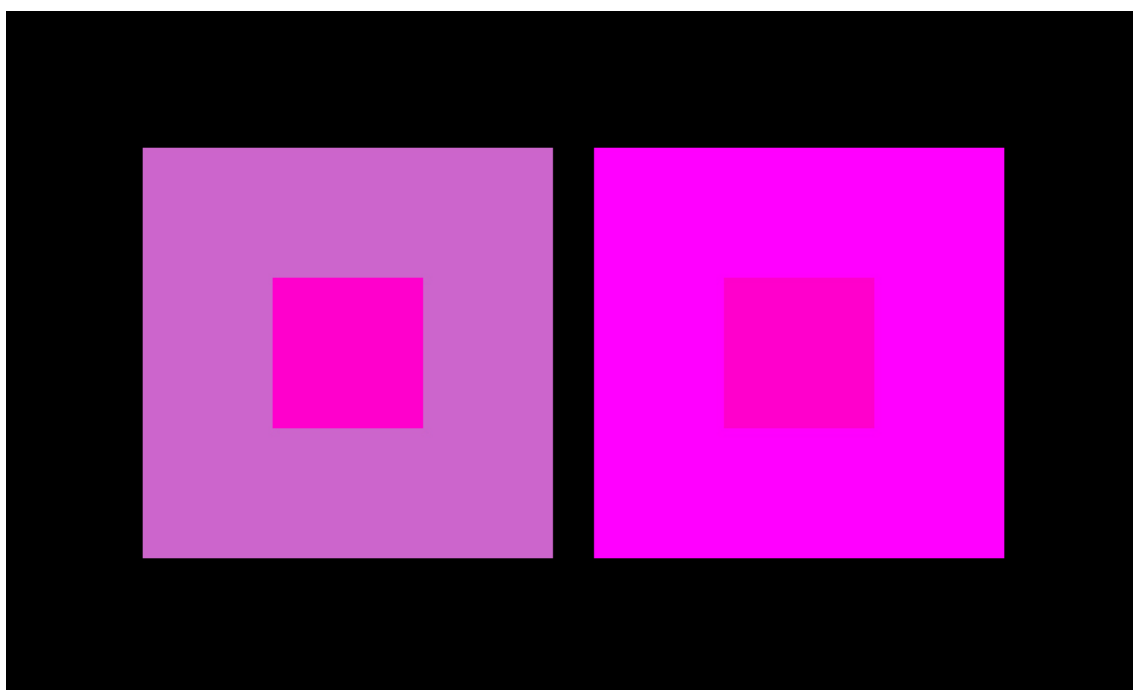
*Obr. 8 Barevný posun v simultánním světlostním kontrastu, vnitřní čtverečky mají stejný tón a čistotu*

Tato iluze se normálně znázorňuje různými odstíny šedé, aby se vyrušily účinky tónu a čistoty. Příklad ukazuje, že také pracuje pro odstíny modré (nebo kteroukoliv barvu), které mají přesně stejný tón a čistotu, ale hodně se liší v intenzitě světla. V každém velkém čtverci je průměrná světlost založena na vnějším a vnitřním čtverci. Kontrast roste kolem tohoto lokálního průměru a posouvá vzhled valéru malého čtverečku v opačném směru. To také znamená, že i oba dva větší čtverce vypadají světlejší, než by vypadaly v jiném nastavení, protože jsou posunuty kontrastem s tmavým pozadím podkladu čtverců. Tento valérový posun je vlastně vizuální iluze nejsnadněji odvoditelná. Ve skutečnosti mnoho lidí neuvěří, že dva středové čtverečky

mají opravdu stejnou světlost. Iluze je tak silná, protože valér dominuje našemu vizuálnímu prožitku.

### 2.3.2. Čistota

Následující silný vizuální účinek na obrázku 9 je zdánlivá změna ve vnímané čistotě identicky obarveného čtverečku.



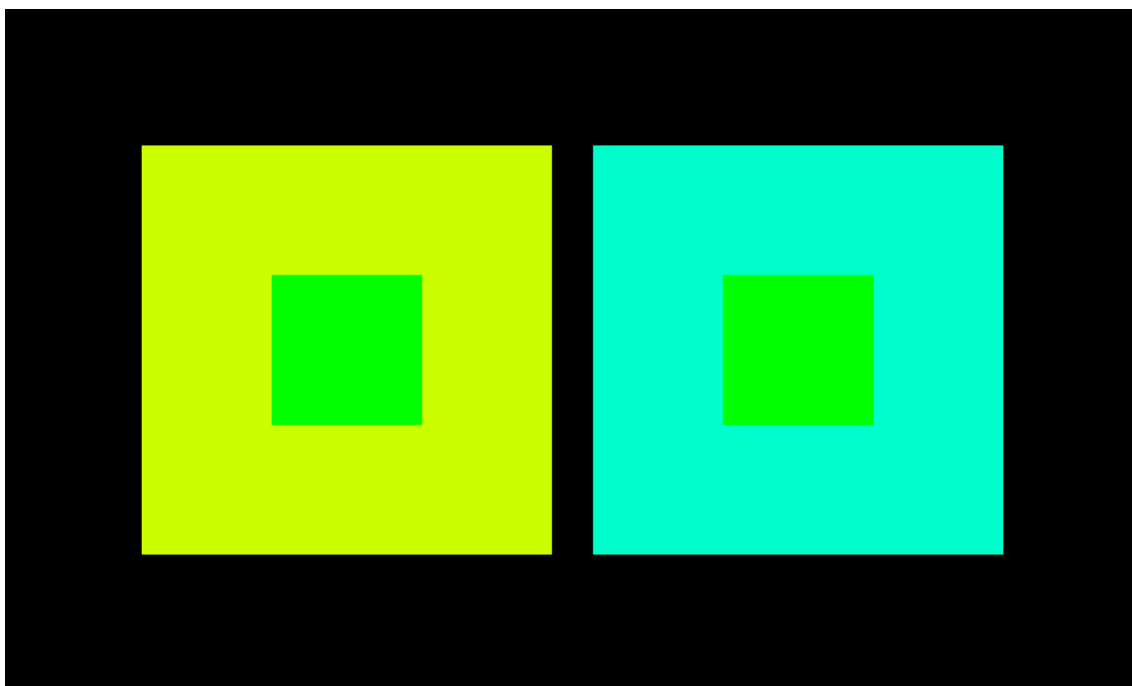
*Obr. 9 Barevná změna v simultánním čistotním kontrastu, vnitřní čtverečky mají stejný tón a světlost.*

Rozdíl v samotné čistotě je dostatečný, aby vyvolal barevný posun: pravý malý čtvereček vypadá tmavěji a mdleji, zatímco čtvereček nalevo vypadá světleji a intenzivněji. (Také můžeme vidět mírnou tónovou změnu, čtvereček vpravo vypadá poněkud modřejší.) Tyto zdánlivé valérové nastanou proto, že magenta vpravo se zdá být zářivější barvou. Oko začleňuje tuto informaci do tmavosti, kterou přisuzuje vnitřním čtverečkům, protože v barevném vidění jsou valér a čistota spojeny.



### 2.3.3. Tón

Nyní je prostřední čtvereček obklopen barvami kontrastujícími v tónu, ale identickými v čistotě a světlosti. Podle „barevné teorie“ by měl být komplementární posun v tónu vidět, ale v praxi je tónový posun těžce znázornitelný. Na tomto příkladě na obrázku 10, kde je menší čtvereček zelené ve větším čtverci žluté a tyrkysové, by však měl být viditelný

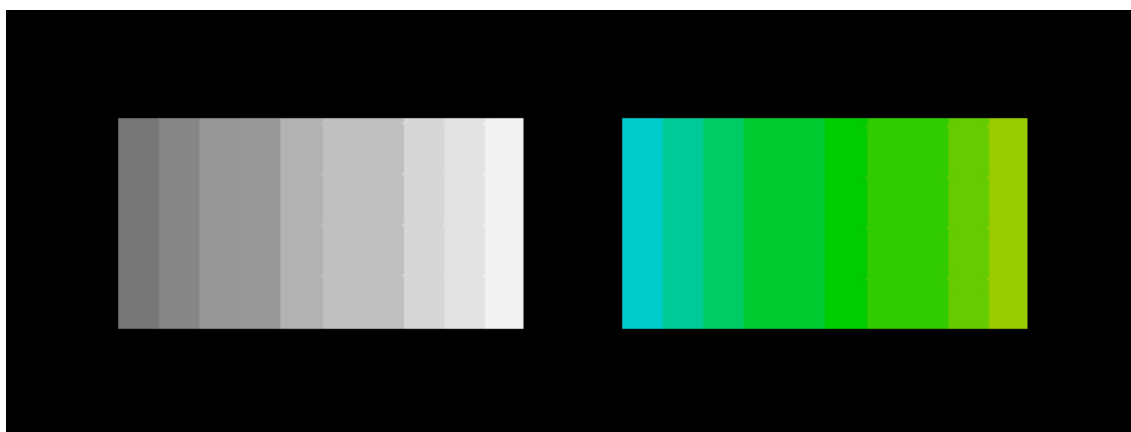


*Obr. 10 Barevné změny v simultánním tónovém kontrastu, vnitřní čtverečky mají stejnou čistotu a světlost*

Tyto tónové posuny můžeme často zahrnout do komplexních změn v tónu i chromě, ale ty obvykle můžou být vyřešeny na standardním barevném kruhu, podle principu „simultánního kontrastu“ stanoveného Michelelem Chevreulem: zelený čtvereček obklopený žlutou by posunul tón jako kdyby byl míchán s vizuální komplementem žluté (tedy magentou); zelený čtvereček s tyrkysovou by tón zelené posunul, jako kdybychom ji míchali s vizuálním komplementem tyrkysové (tedy středně červenou).

## 2.4. Kontrast hran a vzorů

Zjednodušující znázornění "čtverce ve čtverci" barevných kontrastů naznačuje, že účinky jsou do jisté míry stejné v jakémkoliv vizuální situaci, to ale není úplná pravda. Kontrast je obvykle nejvyšší v okolí hrany, zvláště mezi oblastmi, které se lehce liší ve světlosti, čistotě, nebo tónu. To dělá hranu viditelnější. První příklad – přechod šedé na obrázku 11 ukazuje Machovy pásy, ty se objeví jasněji v oblastech, které ve světlosti lehce zvyšují napříč - v každém pásu se okraj proti tmavšímu pásu jeví světlejší a okraj naproti světlejšímu pásu vypadá tmavší. Světlostní posun roste na obou stranách v blízkosti okraje, což dává vzhled rýhovaných drážek, jako žlábkování na jónském sloupě.



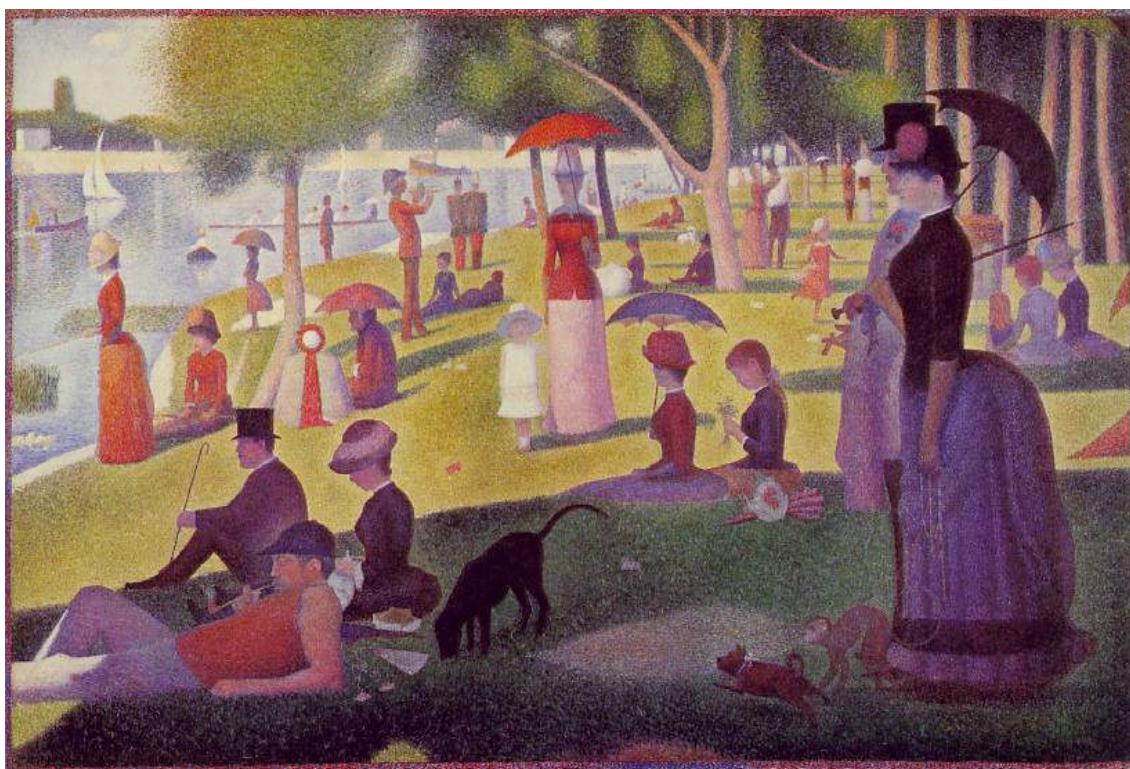
Obr. 11 Machovy pásy pro malé změny v sytosti (vlevo) nebo tónu (vpravo)

Druhý příklad z obrázku 11, užívající tónové přechody z tyrkysové do žlutozelené, ukazuje slabší účinek než by se dal očekávat, protože tón představuje v tomto případě slabší podnět než světlost. Machův efekt je nejviditelnější v pásích na krajních koncích schématu: v každém pásu se okraj s žlutější barvou posouvá směrem k modré a okraj sousedící s modřejší barvou se posouvá směrem ke žluté.

Takto způsobený posun v kvalitě barvy podél hran byl popsán také Michelem Chevreulem, (ukázka z jeho knihy na obrázku 12), který měl vliv na pár tehdejších umělců, použít ho jako umělý akcentní prostředek – příkladem je „Un Dimanche apres-midi a Ile de Grande Jatte“ George Seurata z roku 1884, na obrázku 13.



Obr. 12 Ukázky z Chevreulovy knihy: *Principy kontrastu a harmonie barev*



Obr. 13 Georges Seurat : *Un Dimanche d'été à l'île de la Grande Jatte*

Ale trik je ve skutečnosti starý a docela snadno ho lze najít už v práci Rembrandta nebo Rafaela (obrázky 14 a 15).

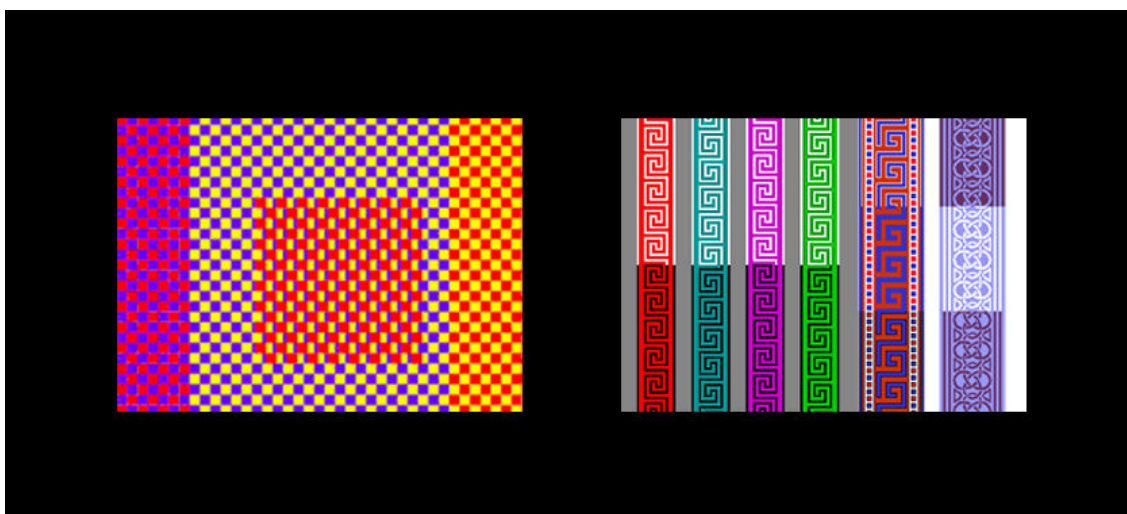


Obr. 14 Rafael



Obr. 15 Rembrant, Noční hlídka

Následující zobrazení jde zpět k nejranějším moderním barevným studiím, které studovaly barevné účinky, způsobené změnami osnov či útků ve stejném textilním vzoru.



Obr. 16 Barevné změny v složitém vzoru – Bezoldovy obrazce

## 2.5. Teorie barevného vnímání

Člověk vnímá nejen tři základní barvy a jas, ale také vnímá barvy ve třech kontinuech – červená/zelená, modrá/žlutá, černá/bílá. Historicky vznikly dvě

psychologické teorie, které zdůrazňovaly jeden z aspektů lidského vnímání barev (tři základní barvy vs. dvě barevná kontinua).

Young-Helmholtzova trichromatická teorie zdůrazňovala existenci tří druhů receptorů (čípků), jejichž podrážděním vzniká barevný vjem. Hlavní oporou této teorie je schopnost vysvětlit příčiny barvosleposti, jako dysfunkci jednoho či více druhů receptorů.

Herringova teorie byla založena na fenomenologickém pozorování, že některé barvy nemohou být vnímány současně. Za základní barvy byly považovány červená, žlutá, zelená a modrá. Tyto barvy lze kombinovat, např. do červenožluté nebo modrozelené, ale některých kombinací nelze dosáhnout – žádná barva nemůže být vnímána jako červenožlutá nebo žlutomodrá. Tato teorie nabízela vysvětlení pro existenci komplementárních paobrazů.

Neuropsychologické výzkumy ukazují, že lidské barevné vnímání implementuje na různých úrovních oba dva popsané systémy.

### **2.5.1. Barevné vidění na úrovni sítnice**

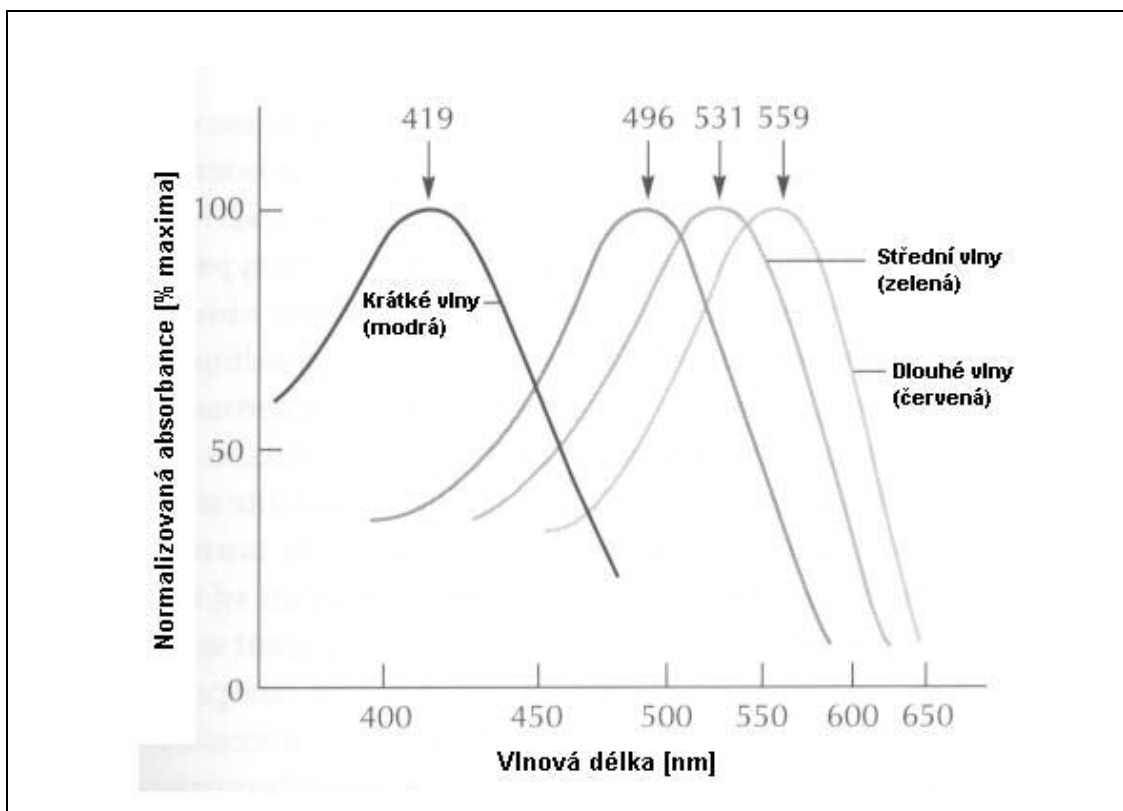
Člověk je schopen vnímat světelné vlny v rozsahu 380-780 nm. Světlo v tomto rozsahu na základě svého vjemu popisujeme jako barevné spektrum.

Světelnými receptory jsou specializované nervové buňky – tyčinky a čípky, které jsou uloženy ve vnější vrstvě sítnice. Tyčinky jsou citlivé na jas světla a člověk na ně spoléhá zejména v šeru. Existují tři druhy čípků, které se liší obsaženým pigmentem a které jsou specializované na vnímání světla tří různých vlnových délek, viz obrázek 17. Právě absence nebo defekt ve struktuře těchto pigmentů způsobuje barvoslepost.

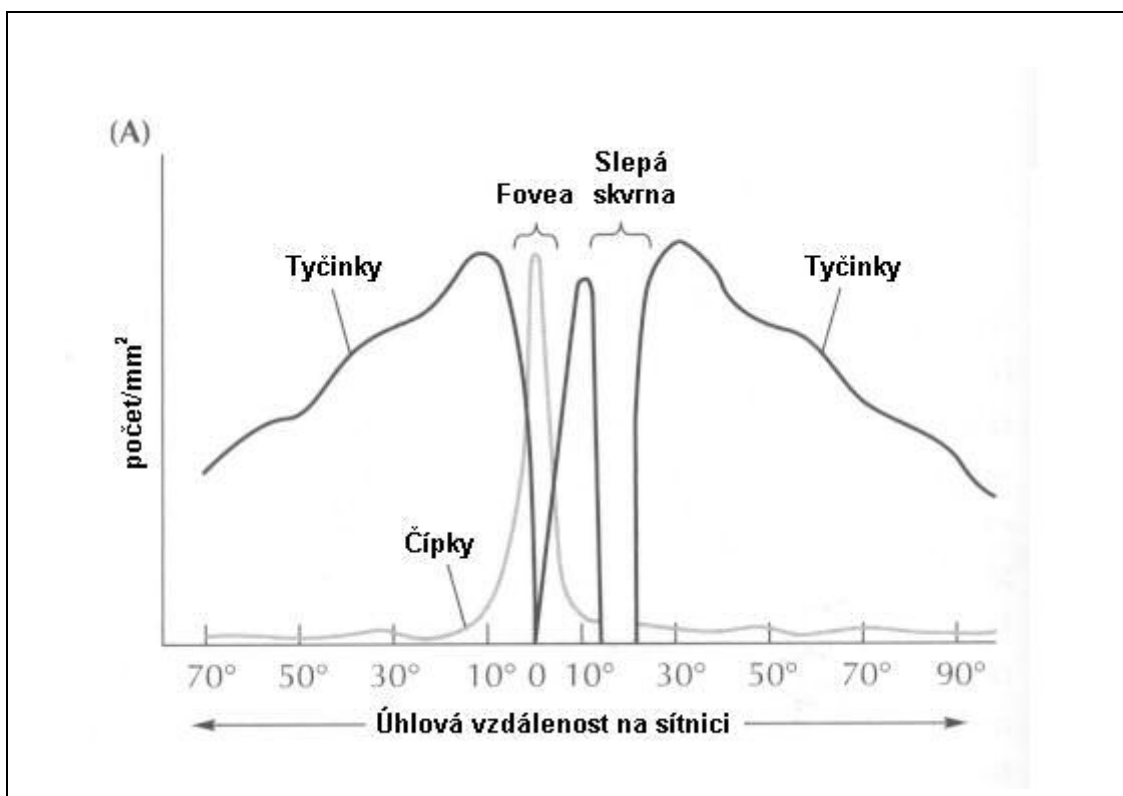
Světlo, které dopadá na sítnici je směsí vln z viditelného rozsahu. Vlny jednotlivých vlnových délek mohou být v této směsi zastoupeny různou měrou. Pokud dvě různé směsi světelných vln stimulují receptory všech tří typů stejnou měrou, výsledným vjemem je stejná barva. Takovým barvám, které jsou vnímány stejně, i když se z fyzikálního hlediska liší, se říká metamerní.

Tyčinky a čípky nejsou na sítnici rozloženy rovnoměrně. V centru nejostřejšího vidění jsou takřka výhradně čípky, jejich počet v periferních částech zorného pole klesá, zde naopak převládají tyčinky, viz obrázek 18.





Obr. 17 Citlivost jednotlivých receptorů na světlo různé vlnové délky



Obr. 18 Hustota tyčinek a čípků v různých částech sítnice

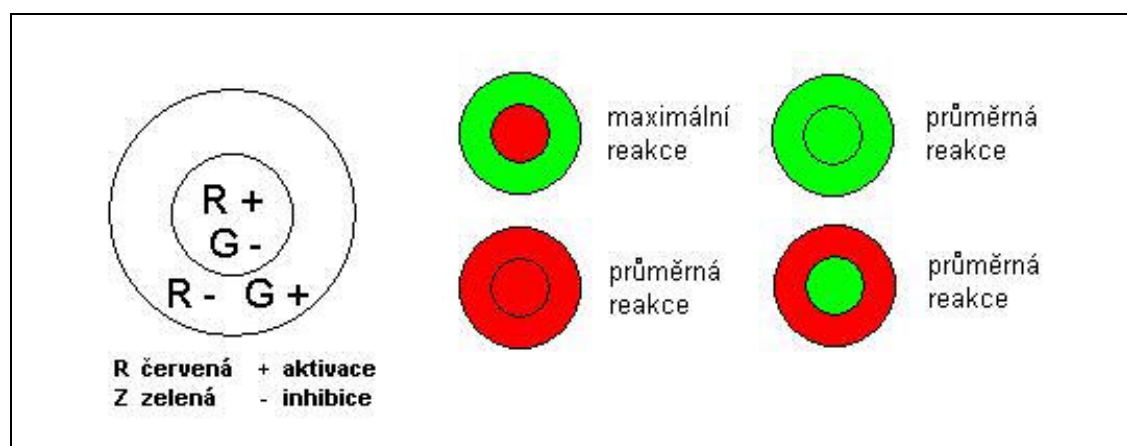
Informace z receptorů jsou zpracovány a integrovány již na úrovni sítnice. Stavba a funkce jednotlivých vrstev sítnice není pro naše účely zajímavá. Podstatná je poslední vrstva - vrstva gangliových buněk. Tyto buňky integrují signály z určité plochy sítnice (tzv. receptive fields) a jejich signály vedou do korové oblasti VI týlního laloku.

### 2.5.2. Barevné vidění na úrovni kůry

Již na úrovni gangliových buněk dochází k důležitému rozdělení na gangliové buňky typu M a typu P. Signály o jasů zprostředkované tyčinkami jsou zpracovávány odděleně v magnocellulárním systému (odtud typ M), informace o barvě získané čípkami zpracovává parvocellulární systém (typ P). Oba systémy se liší nejen druhem vstupních informací, ale jsou také specializované na jiné úlohy.

Magnocellulární systém je evolučně starší. Tento systém podává celkové informace o organizaci scény. Také má lepší časové rozlišení a proto citlivě zachycuje pohyb. Parvocellulární systém není tak citlivý na kontrast a pomaleji rozlišuje v čase, jeho výhodou je rozlišování barev. Tím pomáhá při rozlišování tvaru a identifikaci předmětů.[7]

Buňky parvocellulárního systému často zpracovávají informace o barvě komplexněji - s ohledem na barvu v okolních receptorových polích. Tyto specializované buňky se nazývají bipolární, protože reagují na kontrast dvou doplňkových barev.



Obr. 19 Ukázka reakce bipolární buňky parvocellulárního systému na různé barvy ve vlastním receptorovém poli a jeho okolí

Tyto buňky reagují buď na kontrast červené/zelené nebo modré/žluté. Z obrázku č.19 je vidět, že informace o zelené, červené a modré odpovídají vlnovým délkám, na

které jsou citlivé jednotlivé druhy čípků. Informace o žluté barvě jsou souhrnem signálů z čípku, které reagují na červenou a zelenou. Bipolární buňky reagují na signál (např. červená) z vlastního receptorového pole excitaci a jsou inhibovány komplementárním barvovým signálem (zelená) z receptorových polí v okolí. Nejvýrazněji reagují tyto Buňky na kontrast -červená v zelené způsobí maximální excitaci, a zelená v červené maximální inhibici. Existují i podobné buňky, které reagují na kontrast jasu (černá v bílé).

### 2.5.3. Barvoslepost

Barvoslepost (daltonismus) je poruchou barevného vnímání. Většinou se nejedná o 100% barvoslepost, tedy naprostou neschopnost rozeznat barvy. Tito lidé některé barvy nedokáží rozeznat (vidí je „stejně“), jiné barvy dokáží rozlišovat bez problémů. Tato porucha je v populaci velmi rozšířená, nejčastěji ji trpí muži (obrázek 20).

	běloši	asiaté	ostatní
muži	8,0%	5,0%	3,0%
ženy	0,5%	0,5%	0,5%

Obr. 20 Rozšíření barvosleposti v závislosti na rase a pohlaví. [10]

Barvoslepost je většinou genetická porucha, způsobená vadou na chromozómu X. Proto postihuje častěji muže, kteří mají jen jeden chromozóm X a tak nemohou vadu kompenzovat genetickou informací z druhého chromozómu X, jako tomu je u žen - přenašeček. U žen dochází k poruše pouze v případě defektu u obou chromozómů X.

Porucha se také může vyvinout během života, pokud je člověk vystaven působení toxických látek. Testování zaměstnanců, kteří s nebezpečnými látkami pracují, ukázalo zhoršení schopnosti rozlišovat mezi žlutou a modrou, které se postupně rozšiřuje i v poškození rozlišování zelené a červené. Mezi rizikové látky patří styren, karbon disulfid, n-hexan, PCE a další rozpouštědla a hnojiva používaná v průmyslu. [9] Podobný efekt mají i některá antibiotika, barbituráty nebo léky proti tuberkulóze.



Barvoslepost může být průvodním jevem některých chronických onemocnění, např. Alzheimerovy choroby, diabetu, leukémie, onemocnění jater, roztroušené sklerózy nebo Parkinsonovy choroby.

Jednou získaná barvoslepost je chronická a neexistuje pro ni léčba. Jedinou možností je navrhovat předměty denní potřeby a běžné signály tak, aby barva nebyla jediným a klíčovým zdrojem informace. Toho se dosahuje redundancí signálu - stejná informace je nesena nejen barvou, ale i třeba tvarem (ikonky), nebo polohou (světla na semaforu).

#### 2.5.4. Druhy barvosleposti

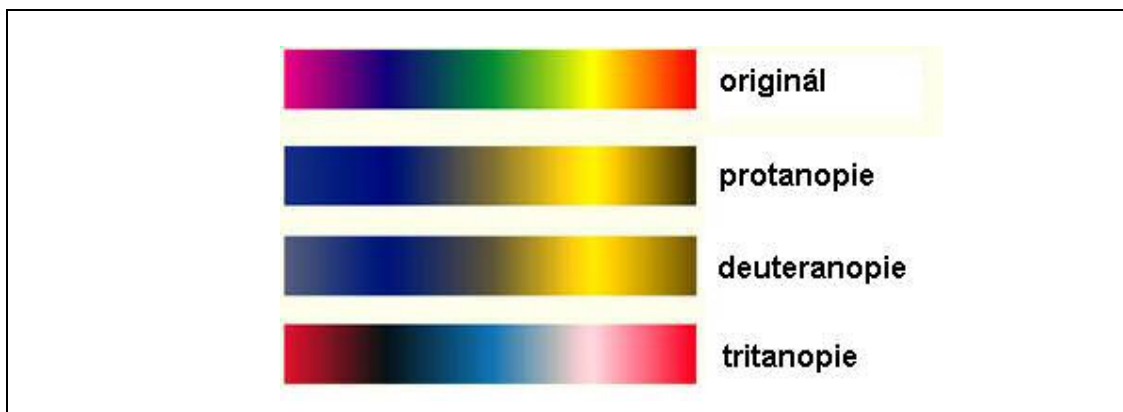
Příčinou barvosleposti je absence nebo defekt pigmentu čípků na sítnici oka. Podle schopnosti rozlišovat barvy se lidé rozlišují do několika skupin. Trichromaté tvoří většinu populace. Lidé, kteří jsou úplně barvoslepi, se nazývají monochromaté nebo také achromaté. Tato porucha je velmi vzácná, vyskytuje se jen u 0,003% mužů-bělochů. Většina lidí s poruchou vnímání barev jsou dichromaté, nebo anomální trichromaté.

Dichromatům chybí v čípcích oka jeden z fotopigmentů. Podle druhu chybějícího pigmentu se tato porucha dělí na protanopii, deuteranopii a tritanopii. Anomální trichromaté mají všechny tři fotopigmenty, ale jeden z nich je vadný. Zde se rozlišují dva druhy poruchy - protanomální a deuteranomální. Četnost jednotlivých poruch je uvedena na obrázku 21.

protanopie	chybí červený pigment	1,0%
deuteranopie	chybí zelený pigment	1,1%
tritanopie	chybí modrý pigment	0,001%
protanomální	anomální červený pigment	1,0%
deuteranomální	anomální zelený pigment	4,9%

Obr. 21 Četnost jednotlivých druhů barvosleposti u mužů-bělochů. [10]

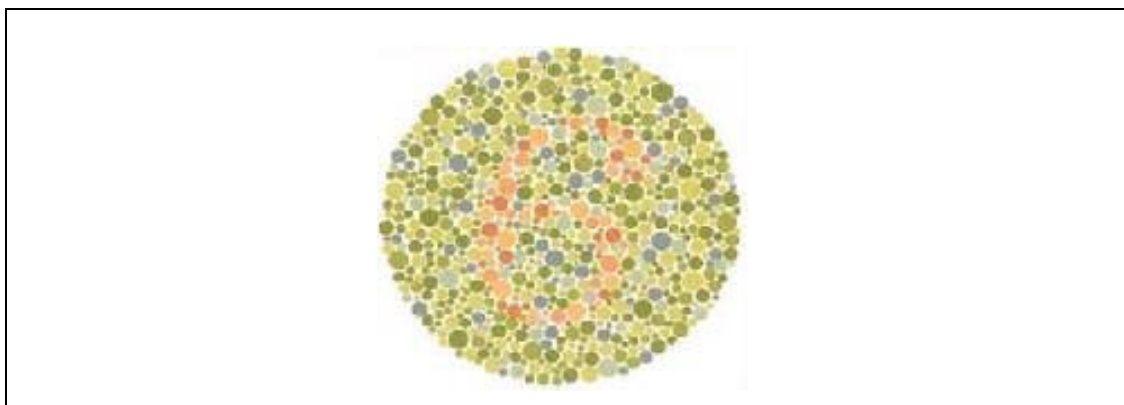
Popsané druhy barvosleposti se liší v tom, které barvy jsou vnímány odlišně. Určitou představu si lze udělat podle obrázku č.22, který znázorňuje, jak absence jednotlivých fotopigmentů ovlivňuje barevné vnímání.



Obr. 22 vnímání barev u jednotlivých poruch barevného vidění

#### 2.5.5. Diagnostika barvosleposti

Nejpoužívanějším testem barvosleposti jsou Ishiharovy tabulky. Kromě tohoto původního testu vzniklo mnoho dalších testů na stejném principu. V tomto testu jsou probandovi postupně předkládány obrázky složené z mnoha barevných koleček různých velikostí (obrázek 23). Kolečka mají různou barvu a některá z nich tvoří v obrázku figuru (číslo nebo písmeno). Úkolem probanda je tuto figuru rozpoznat. Existují i varianty nezávislé na vzdělání a kultuře, kde je figurou cesta vedoucí napříč obrázkem.



Obr. 23 Ukázka Ishiharova testu

Od barvosleposti způsobené defektem nebo absencí fotopigmentu lze odlišit cerebrální achromatopsii. Pacienti s cerebrální achromatopsií si nedokáží barvu představit, při tom ale není jejich schopnost rozlišovat mezi barvami postižena (nebo ne tak závažně postižena). Svět kolem sebe popisují jako černobílý. Cerebrální achromatopsie bývá způsobená poškozením gyru fusiformis a často bývá doprovázena i dalšími symptomy jako je prosopagnozie, alexie nebo vizuální agnozie.

Co vlastně barvoslepí vidí? Na obrázku 22 bylo znázorněno světelné spektrum tak, jak jej vidí barvoslepí lidé. Jak to ale můžeme vědět? Vždyť nám to žádný barvoslepý člověk nemůže nakreslit. Při rekonstrukci takových obrazů se používají dvě základní metody - 1) co barvoslepí nevidí, a 2) co vidí místo toho?

První metoda již vlastně byla popsána. Vychází ze stejného principu jako Ishiharovy tabule. Při tomto optometrickém výzkumu jsou barvoslepým prezentovány barvy a jsou požádáni, aby určili, zda se jedná o tutéž barvu, nebo o dvě různé barvy. Lze najít nějakou zákonitost? Nejdříve je potřeba najít vhodný formát, ve kterém barvu můžeme barvu vhodně numericky vyjádřit.

Barvu je možné vyjádřit v různých formátech. Dobře známým formátem je například RGB, ve kterém se specifikují barvy pro počítačový monitor. V tomto formátu se barvy vyjadřují jasně třemi barevnými složkami - červené, zelené a modré. Jiné formáty používají odlišné referenční barvy (např. CMY používá tyrkysovou, fialovou, žlutou). [11]

### **3. Fotometrie**

#### **3.1. Úvod do fotometrie**

Fotometrie je část fyzikální optiky zabývající se teorií a přístroji pro měření světelného záření, tj. záření ve viditelné oblasti spektra. Pro tyto účely byly vytvořeny fotometrické veličiny a jim odpovídající jednotky, přičemž každé energetické veličině vztahující se obecně na záření odpovídá určitá fotometrická veličina. Měření prováděná v určitých oblastech spektra elektromagnetických vln se podstatně liší od fotometrických měření jak způsoby, tak i používanými fotometrickými zařízeními, fotometry.

Světlo má dvojí charakter, vlnový a kvantový. Ve fotometrii lze tento dvojí charakter světla pominout a pracovat pouze s pojmem paprsku světla, a to za předpokladu, že diferenciál délky budeme uvažovat vždy větší, než je sledovaná vlnová délka světla. Totéž se vztahuje na diferenciály času, plochy i objemu, které musí být dostatečně veliké, aby se tím vyloučil vliv vlnového charakteru světla a mohlo se hovořit o průměrných hodnotách těchto veličin.

Obvyklé rozdělení fotometrie dle použitých metod a jednotek:

- absolutní - určuje fotometrické veličiny v absolutních jednotkách, bez porovnání s jiným zdrojem světelného záření. Přijímače záření používané v absolutních fotometrických metodách se vyznačují tím, že jsou na všechny vlnové délky záření stejně citlivé.
- relativní - k naměření fotometrické veličiny potřebují kromě přijímače záření také srovnávací zdroj, se kterým se srovnává zdroj měřený.

Rozdělení relativní fotometrie:

1. vizuální - přijímačem záření je lidské oko,
2. fotografická - přijímačem záření je fotografická emulze na skleněné desce, případně jiné vhodné podložce, jako kupříkladu PVC fólii apod.
3. elektrickou - zahrnuje metody fotoelektrické, termoelektrické, bolometrické a jiné, které vyžadují použití ještě vhodný registrační přístroj, např. galvanoměru, elektrometru, osciloskopu apod.

V současné době mají nejširší použití fotometrické metody elektrické, díky existenci mnoha poměrně vysoce citlivých elektrických receptorů. Přesto však vizuální fotometrie má značný praktický význam v hodnocení vizuálních optických přístrojů z hlediska celkového zrakového vjemu. Vizuální fotometrické metody jsou velmi důležité při průzkumu fyziologických vlastností lidského oka.

### **3.2. Vizuální fotometrie**

Vizuální fotometrie pojednává o světelných měřeních, ve kterých hlavní roli zastává oko pozorovatele. Pozorovatel na základě svého zrakového vjemu posuzuje zda

je či není rozdíl v jasech dvou, případně i více povrchů. Jestliže se tyto povrchy dotýkají, je toto posuzování snazší. Nejsnazšího posuzování rozdílů v jasech se dosáhne, jestliže se nachází rozhraní srovnávaných povrchů o určitých jasech uprostřed zorného pole. Jsou-li srovnávané povrchy vzájemně od sebe vzdáleny, pak jistota v posuzování, jeho spolehlivost a přesnost klesá se vzrůstající jejich vzdáleností. Tato vlastnost vidění je základem pro světelná měření prováděná vizuálně.

### **3.2.1. Fotometrické pole**

Fotometrické pole je tvořeno srovnávanými povrchy o určitých jasech. Fotometrické pole je tedy rozděleno na dvě části, pole měřené a etalonní.

Vzájemný dotyk těchto částí může být buď skutečný, nebo může být vytvořen uměle tak, aby oko pozorovatele mělo dojem, že obě pole se dotýkají, i když mohou být vzájemně od sebe vzdálena. Všechny pomůcky a přístroje či jiná zařízení, která kromě jiného umožňují uskutečnit buď skutečný, nebo umělý dotyk okem srovnávaných polí, se nazývají zpravidla vizuální fotometry.

Vizuální fotometry jsou použitelné pro fotometrická měření jak ve světle bílém se stejným nebo rozdílným zabarvením, tak i v monochromatickém světle. Zpravidla se jimi měří jasy srovnáním se známým jasem nebo se jimi zkoumají různé fyziologické vlastnosti lidského oka.

### **3.2.2. Faktory ovlivňující přesnost vizuálních fotometrických měření**

Vizuální fotometrická měření jsou subjektivní kvůli vysokým adaptačním schopnostem oka. Přesnost výsledku měření je závislá podmínkách fotometrického měření.

Kromě adaptace oka hraje nemalou roli při fotometrických měřeních i spektrální citlivost sítnice. Aby z tohoto hlediska nedocházelo ke značným rozdílům při fotometrických měřeních, byla v r. 1924 přijata Mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE) normalizovaná poměrná světelná účinnost jednobarevného záření  $V_\lambda$  průměrného lidského oka pro tzv. „denní“ (fotopické neboli čípkové) vidění a v roce 1951 pro tzv. „noční“ či „soumrakové“ (skotopické neboli tyčinkové) vidění  $V'_\lambda$ . Pro přechodnou oblast tzv. mezopického vidění, (jasy od  $10^3$  po  $10^2$  cd/m<sup>2</sup>) dosud poměrné světelné

účinnosti jednobarevného záření lidského oka normalizovány nebyly pro nedostatek věrohodných výsledků měření.

V důsledku různých spektrálních citlivostí oka při různých jasech bývá vizuální fotometrie dělena na:

- fotometrii vysokých jasů,
- fotometrii malých jasů.

Za hranici mezi vysokými a malými jasy bývá nejčastěji považován jas  $0,1 \text{cd/m}^2$ .

Vizuální fotometrování je závislé na mnoha faktorech. V zásadě je nutno brát v úvahu následující okolnosti:

1. *polohu obrazu fotometrického pole na sítnici oka pozorovatele,*
2. *velikost a tvar fotometrického pole,*
3. *jas fotometrického pole,*
4. *spektrální zabarvení světla ve srovnávaných fotometrických polích,*
5. *adaptaci oka pozorovatele a jas pozadí v okolí fotometrického pole,*
6. *výběr pozorovatelů.*

#### *1. Poloha obrazu fotometrického pole na sítnici oka pozorovatele*

Citlivost jednoho a téhož druhu elementů sítnice, tj. buď pouze tyčinek, nebo pouze periferních čípků, zůstává přibližně neměnná na poměrně značné části periferie sítnice a zmenšuje se až v oblastech nejvíce vzdálených od středu sítnice.

Protože světelně citlivé elementy (tyčinky a čípky) jsou na sítnici rozloženy velmi nerovnoměrně, dochází k tomu, že různé části sítnice oka mají rozdílnou celkovou citlivost.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem se zpravidla při světelných měřeních využívá pouze střední části sítnice. Určitou výjimku tvoří světelná měření při velmi malých jasech, tj. při měření hvězd nebo vzdálených signálních světelných zdrojů.

Ovšem i vlastnosti oka ve střední části sítnice jsou rozdílné. Tyto rozdíly se projevují u různých pozorovatelů ve větší či menší míře a jejich důsledek je pak patrný ve fotometrické praxi .

## 2. Velikost a tvar fotometrického pole

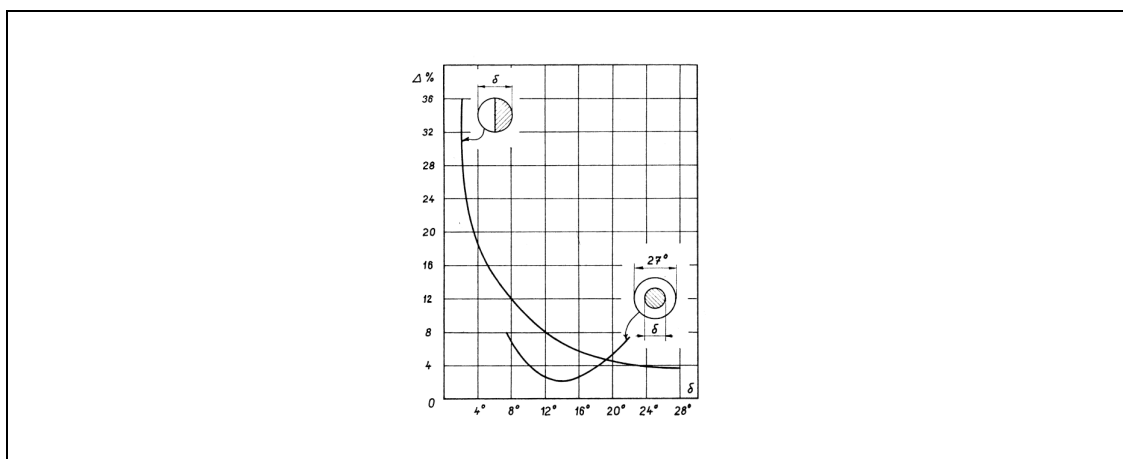
Volba velikosti a tvaru fotometrického pole pro vizuální fotometrická měření byla a zčásti ještě dosud je předmětem diskusí, ať již doložených experimentem, nebo se zakládajících jen na osobních názorech jednotlivých autorů. Na základě údajů z literatury se jeví, že uspokojivá shoda výsledků získaných z různých způsobů měření se dosáhne pouze pokud úhlové rozměry srovnávaných polí (tj. celého fotometrického pole) jsou přibližně  $2^\circ$ , někdy dokonce  $1,5^\circ$ . V mnohých praktických případech světelných měření, převážně když je spektrální složení světla měřeného i srovnávacího pole úplně stejné, je možné volit úhlový rozměr fotometrického pole  $4^\circ$  až  $6^\circ$ , případně i  $7^\circ$ , čímž se nesporně ulehčí oku při měřeních.

Z uvedeného vyplývá, že průměrné hodnoty velikosti vhodného fotometrického pole leží v mezích  $2,5^\circ$  až  $3^\circ$ .

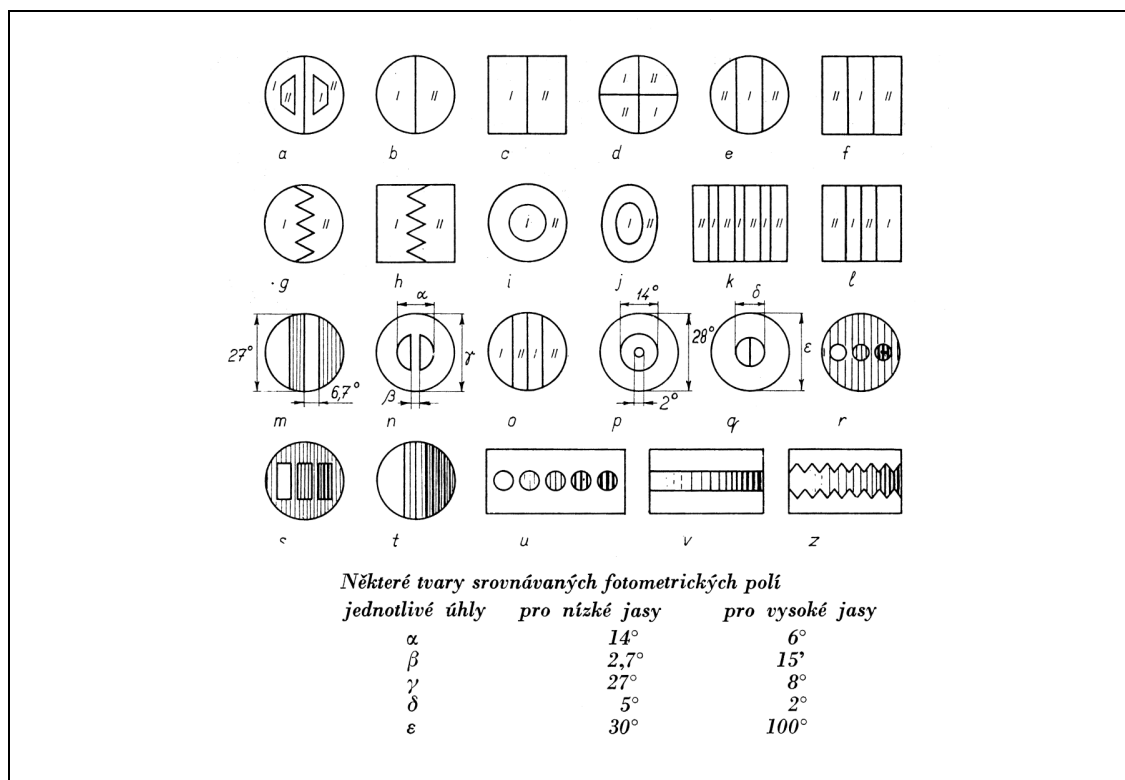
Pro barevná měření se doporučuje používat úhlové rozměry fotometrického pole  $10^\circ$  až  $12^\circ$ .

Uvedené hodnoty rozměrů fotometrického pole se vztahují pro fotometrická měření o tzv. vysokých jasech.

Při měření malých jasů (tj. menší než  $10^{-1} \text{ cd/m}^2$ ) je optimální velikost fotometrického pole  $27^\circ$ . Jsou-li srovnávaná pole tvaru kruhu (vnější srovnávací pole je pak tvaru mezikruží s vnějším rozměrem  $27^\circ$ ), pak optimální rozměr vnitřního pole je  $14^\circ$ . Poměr průměrů vnitřního a vnějšího pole je tedy dán čísly 1 : 1,8 až 1 : 1,9. Příklad vlivu velikosti a tvaru fotometrických měření je na obrázku. 24.



Obr. 24 Vliv velikosti fotometrického pole na přesnost fotometrických měření při jasů fotometrického pole  $0,0006 \text{ cd/m}^2$



Obr. 25 Některé tvary srovnávaných fotometrických polí

Tvary fotometrických polí mohou být velmi rozličné (obrázek 25). Orientace rozhraní srovnávaných fotometrických polí není podstatná. Ze všech uvedených tvarů fotometrických polí je nejčastěji užíván tvar navržený Lummerem a Brodhunem v roce 1889 (obrázek 25a) a bývá často nazýván kontrastním fotometrickým polem. Kontrastním proto, že při srovnání jasů v pravé polovině pole se ztratí rozhraní mezi půlkruhovým a lichoběžníkovým polem, ale v levé polovině pole zůstane toto rozhraní ještě patrné.

Rozhraní mezi srovnávanými poli musí být vždy ostré, pole se musí dotýkat. Rozložení jasů i zabarvení světla v každém ze srovnávaných polí musí být rovnoměrné. Rozdíl v zabarvení světla ve srovnávaném a měřeném poli, vyjádřený rozdílem teploty chromatičnosti, nemá přesahovat 20 miredů.

### 3. Jas fotometrického pole a jeho vliv na přesnost měření

V obecném případě je přesnost fotometrických měření závislá na zrakových vlastnostech, z nichž nejdůležitější je schopnost rozeznat přírůstek jasů v jednom ze srovnávaných polí v porovnání k jasům druhého srovnávacího pole fotometru. Tato vlastnost oka bývá charakterizována tzv. kontrastní citlivostí oka (práh vnímaného



kontrastu). V mnohých průměrných podmínkách měření je práh vnímaného kontrastu vyjádřený poměrem  $\Delta L/L$  přibližně 0,005 až 0,02. To se zpravidla číselně rovná přesnosti fotometrických měření.

Přesnost měření pro měření prováděná jedním okem je odlišná od přesnosti měření pro měření prováděnými oběma očima. Při pozorování fotometrického pole oběma očima se práh kontrastní citlivosti zvyšuje až o 1,5násobek, čímž se také zvyšuje přesnost měření.

#### *4. Spektrální zabarvení světla ve srovnávaných fotometrických polích*

V mnohých praktických případech je nutné provádět fotometrická měření světla s různým spektrálním zabarvením. Pokud je rozdíl v barvách nepatrný, zpravidla nevznikají zvláštní těžkosti při fotometrování.

Protože různí pozorovatelé nemají stejnou citlivost očí k různým barvám, jsou patrné rozdíly ve výsledcích světelných měření. Tyto rozdíly jsou tím větší, čím větší je rozdíl v zabarvení srovnávaných polí. Proto je při závažnějších měřeních nutné, aby tato měření byla prováděna více pozorovateli.

#### *5. Adaptace oka pozorovatele a jas pozadí v okolí fotometrického pole*

Poměrná citlivost oka k barvám a jiné vlastnosti vidění u jednoho pozorovatele se mění v závislostech na velikosti jasu zorného pole. To znamená, že oko je pak v různých stavech adaptace. Adaptace oka je tedy jeho schopnost přizpůsobovat se k určitému jasu zorného pole. Se změnou jasu zorného pole se mění i adaptace oka.

Z hlediska světelných měření je možné uvést změnu následujících vlastností oka:

- barevná citlivost,
- kontrastní citlivost,
- rychlost zrakového vnímání,
- rychlost zanikání a opětového vybuzení zrakového vjemu
- pracovní schopnost a únava zraku.

#### *6. Výběr pozorovatelů*

Protože všechna měření se vztahují k tzv. průměrnému oku a spektrální citlivost se ve větší nebo menší míře odchyluje od tzv. průměrného oka, je obtížné pro přesná měření vybrat vhodné pozorovatele. Z tohoto důvodu se vybírají pozorovatelé, jejichž

spektrální citlivost oka se co nejvíce blíží k střednímu či průměrnému oku a rozptýl v jejich spektrální citlivosti je rovnoměrně rozložen na obě strany od spektrální citlivosti průměrného oka. Tento způsob výběru pozorovatelů je velmi složitý a pracný, vyžaduje si zvláštní laboratorní vybavení.

Jednodušší a dostupnější způsob, přitom dostatečně spolehlivý, je způsob určení propustnosti několika barevných absorbentů, např. modrého a žlutého, případně růžového a zeleného filtru. Jednotliví pozorovatelé měří potřebný součinitel propustnosti se zdrojem o známém poměrném rozložení zářivé energie ve spektru. Z pozorovatelů se pak vybírají ti, u kterých je průměrný naměřený součinitel propustnosti nejbližší k teoretickému. Spolehlivost tohoto způsobu výběru pozorovatelů je závislá na dostupné přesnosti měření spektrálních součinitelů propustnosti.

Provádí-li se měření malým počtem pozorovatelů, je možné použít pro hodnocení výsledků korekčních koeficientů získaných pro jednotlivé pozorovatele podrobným průzkumem.

Při velmi pečlivě vybraných pozorovatelích se přesnost měření v jedné laboratoři pohybuje kolem  $\pm 0,5 \%$ , v závislosti na druhu světelných měření. Srovnávají-li se výsledky měření mezi různými laboratořemi, nepřesnost výsledků se může projevit vyšší (přibližně  $\pm 1 \%$ ), a to proto, že není možné ve všech laboratořích vytvořit vzájemně stejné podmínky měření.

K těmto všeobecným požadavkům na výběr pozorovatelů patří ještě podmínka jejich omezeného stáří (přibližně do 30 let). U lidí nad 30 let dochází k zeslabení citlivosti oka ke krátkovlnné oblasti spektra, zvláště pak pro vlnové délky pod 400 nm. Spektrální citlivost lidského oka se nemění s roční dobou, ale absolutní citlivost adaptovaného oka na tmu je vyšší v zimním a na počátku jarního období než v období letním.

## **4. Kolorimetrie**

Ačkoliv je vnímání barev subjektivní, je třeba provádět také objektivní měření barevnosti. Například absorpční spektrum barviva v roztoku (nebo remisní spektrum obarveného substrátu) popisuje vztah mezi zářením a strukturou barviva (spektroskopie)

a je z fyzikálního hlediska objektivním popisem barevnosti. Bohužel ale absorpční (nebo reflexní) spektrum nestačí k objektivnímu popisu barevnosti a to ze dvou příčin:

- Naše oko je různě citlivé na různé vlnové délky záření kvůli tomu, že má jednak dvojí druh receptorů (čípky a tyčinky) a čípky obsahují tříbarevné světlocitlivé pigmenty, které jsou různě citlivé v různých oblastech spektra.
- Dopadající sluneční záření nemá stejné intenzity v celém svém spektru, neboli energie slunečního záření má určitou vlnovou distribuci.

#### 4.1. CIE systém

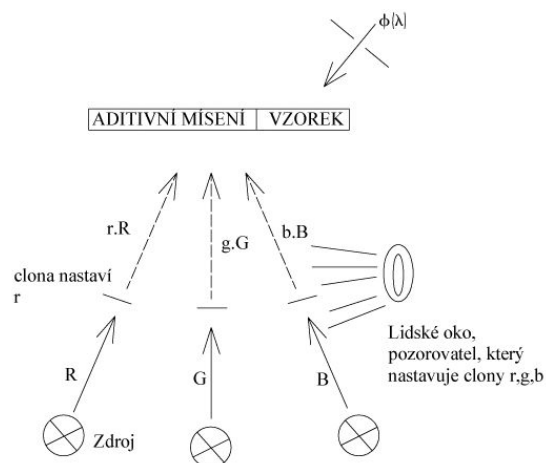
Systém měření barevnosti – tzv. CIE systém (Commission International de l'Eclairage) – je založen na třech základních barvách (monochromatických světlech) a je proto trojrozměrný. Tyto základní barvy jsou:

- červená (**R**, red, 700 nm, světelný tok 1 lm),
- zelená (**G**, green, 546,1 nm, světelný tok 4,6 lm),
- modrá (**B**, blue, 435,8 nm, světelný tok 0,6 lm).

Ze základních barev lze aditivním míšením ve vhodném poměru napodobit barvu jakéhokoliv povrchu, neboli jakýkoli barevný vjem lze vzбудit třemi (souhlasí s počtem receptorů) na sobě nezávislými základními barvami.

##### Princip aditivního míšení

Nejprve se definuje barva povrchu jako monochromatické světlo určité vlnové délky  $\lambda$  (dopad monochromatického světla na dokonale bílou plochu)



Obr. 26 Aditivní míchání barev

Matemicky ve vektorovém počtu lze barvu vzorku (vektor  $\Phi$ ) vyjádřit jako lineární součet tří lineárně nezávislých barev (jednotkových vektorů  $R, G, B$ ).

$$f'(\lambda) \cdot \phi(\lambda) = r'(\lambda) \cdot R + g'(\lambda) \cdot G + b'(\lambda) \cdot B \quad (1)$$

Následující normalizací na jednotkovou intenzitu:

$$m = r' + g' + b' \quad (2)$$

$$r = \frac{r'}{m}; g = \frac{g'}{m}; b = \frac{b'}{m} \quad (3)$$

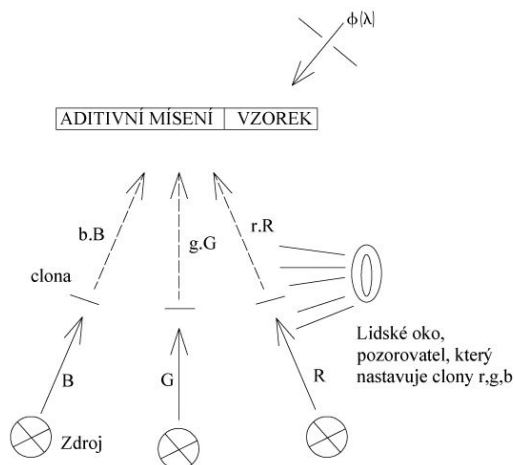
$$\frac{f'}{m} = 1 \quad (4)$$

dostaneme vyjádření monochromatické barvy  $\Phi(\lambda)$  jako součet barev základních:

$$\phi(\lambda) = r(\lambda) \cdot R + g(\lambda) \cdot G + b(\lambda) \cdot B \quad (5)$$

Koeficientům  $r, g, b$  říkáme barevné podněty (tristimulus values) nebo také trichromatické složky v systému **RGB**. Jejich součet je vždy roven jedné. Tyto koeficienty udávají souřadnice vektoru barvy  $\Phi$  v **R, G, B** systému. Clony (obrázek 26) nastavují intenzitu záření, neboli množství fotonů vstupujících do oka za sekundu.

Při takto provedeném pokusu lze velmi brzo zjistit, že až na zvolené základní barvy není možné monochromatické barvy  $\Phi(\lambda)$  napodobit nastavováním clon (koeficientů  $r, g, b$ ). Aby bylo dosaženo v některých případech shody vjemů mezi vzorkem a připravenou barvou, musí se naopak „pustit“ část červeného světla na vzorek



Obr. 27 Aditivní míchání barev

To znamená, že pro určité barvy ( $\lambda$ ) má koeficient  $r(\lambda)$  zápornou hodnotu. Podobně lze nalézt barvy, kde budou záporné koeficienty  $b$ , nebo  $g$ . Vždy je ovšem záporný pouze jeden z koeficientů.

Další výpočet plyne ze znalosti spektrálního rozložení zdroje záření  $E(\lambda)$  (např. slunce) - je tabelováno (CIE tabulky tzv. standardních zdrojů) a ze znalosti spektrálního rozložení remise  $\rho(\lambda)$  (nebo transmise  $\tau(\lambda)$  u průsvitných těles) daného barevného vzorku, kde platí, že energie dané vlnové délky dopadající do našeho oka  $P(\lambda) = E(\lambda)\rho(\lambda)$ .

Platí:

$$r = \int_{\lambda} E(\lambda)\rho(\lambda)\underline{r}(\lambda)d\lambda; \quad g = \int_{\lambda} E(\lambda)\rho(\lambda)\underline{g}(\lambda)d\lambda; \quad b = \int_{\lambda} E(\lambda)\rho(\lambda)\underline{b}(\lambda)d\lambda; \quad (6)$$

Protože s takto definovanou soustavou by se špatně pracovalo, přešla CIE z báze **R, G, B** na bázi tvořenou tzv. imaginárními barvami X, Y, Z (imaginární světla) zvolenými tak, aby všechny trichromatické složky (barevné podněty)  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  byly pro všechny monochromatické barvy kladné:

$$\phi(\lambda) = X(\lambda) \cdot X + Y(\lambda) \cdot Y + Z(\lambda) \cdot Z \quad (7)$$

Koeficienty X, Y, Z jsou pro průměrné lidské oko tabelovány v normách CIE a jejich součet je roven jedné.

Přechod z **R, G, B** systému na systém **X, Y, Z** je transformací, kde pro primární světla (jednotkové vektory) platí:

$$X = 2,36470 R - 0,51515 G + 0,00520 B \quad (8)$$

$$Y = -0,89656 R + 1,42641 G - 0,01441 B \quad (9)$$

$$Z = -0,46808 R + 0,08874 G + 1,00921 B \quad (10)$$

a pro trichromatické složky (koeficienty) platí transformační vztahy:

$$X = 0,36470 r + 1,75189 g + 1,13020 b; \quad r = 2,36470 X - 0,89656 Y - 0,46808 Z \quad (11)$$

$$Y = 1,00000 r + 4,59090 g + 0,06012 b; \quad g = -0,51515 X + 1,42640 Y + 0,08874 Z \quad (12)$$

$$Z = 0,00000 r + 0,05650 g + 5,59440 b; \quad b = 0,00520 X - 0,01441 Y + 1,00921 Z \quad (13)$$

Touto transformací vznikne nová souřadnicová soustava s následujícími vlastnostmi:

- Jedná se o fyzikálně nereálné zdroje, kde X a Z mají nulový jas, čili informace o jasu je v souřadnici Y.
- Tyto imaginární zdroje mají větší sytost než spektrální barvy. základní barvy X, Y, Z smíchané v poměru 1:1:1: vyrovnávají izoenergetické bílé světlo.

Obdobně jako u systému **R, G, B** jsou i zde tabelovány hodnoty fyziologických členitelů (distribuční koeficienty)  $\underline{x}(\lambda)$ ,  $\underline{y}(\lambda)$ ,  $\underline{z}(\lambda)$ , . Platí tedy, že trichromatické složky (X, Y, Z) dané barvy vzorku jsou dány sumou součinů světelného toku zdroje koeficientu reemise a citlivosti oka:

$$X = k \sum E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{x}(\lambda) \cdot \Delta(\lambda) \quad (14)$$

$$Y = k \sum E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{y}(\lambda) \cdot \Delta(\lambda) \quad (15)$$

$$Z = k \sum E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{z}(\lambda) \cdot \Delta(\lambda) \quad (16)$$

kde sumaci provádíme pro všechny vlnové délky v rozsahu od 380 do 780 nm. Fyzikálně lépe je to vyjádřeno integrály:

$$X = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{x}(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (17)$$

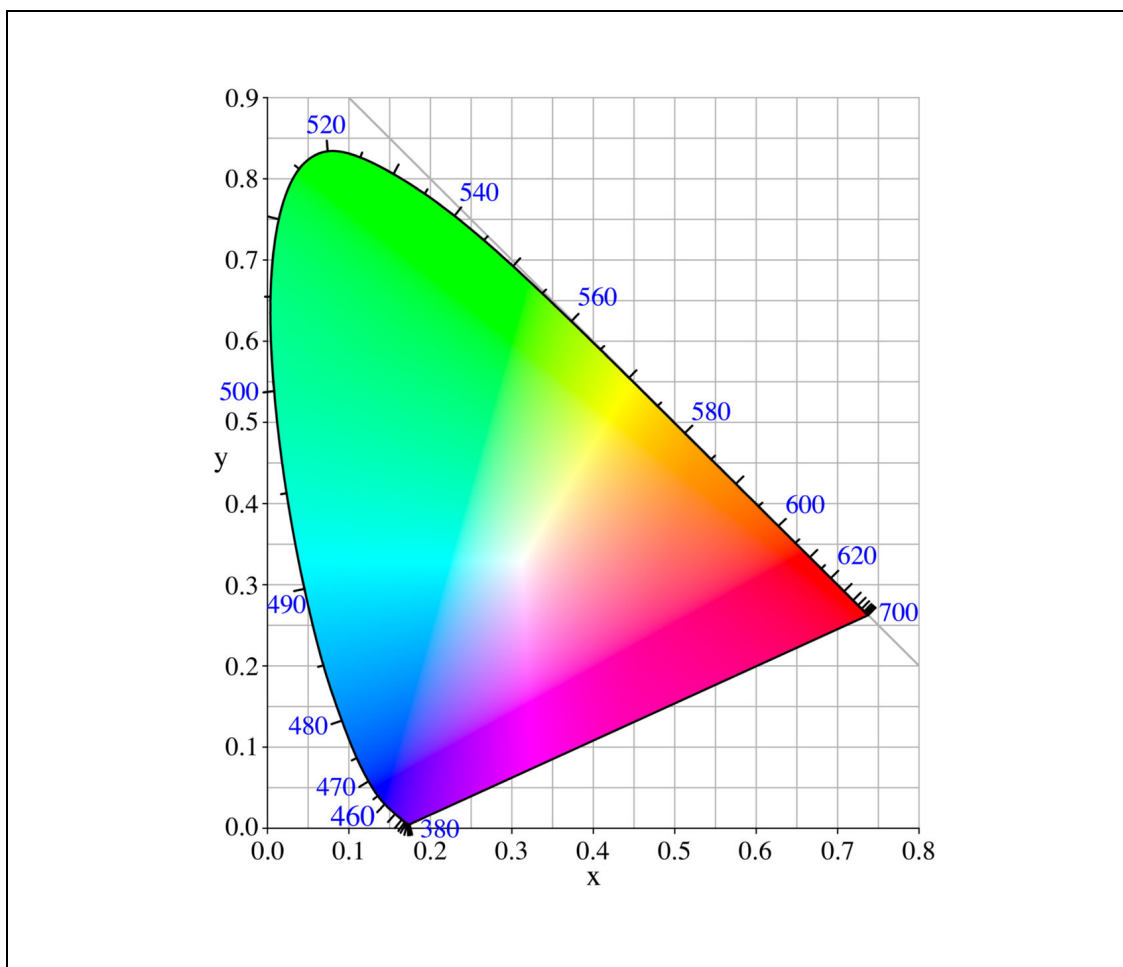
$$Y = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{y}(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (18)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \underline{z}(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (19)$$

kde normalizující faktor k byl určen dohodou:

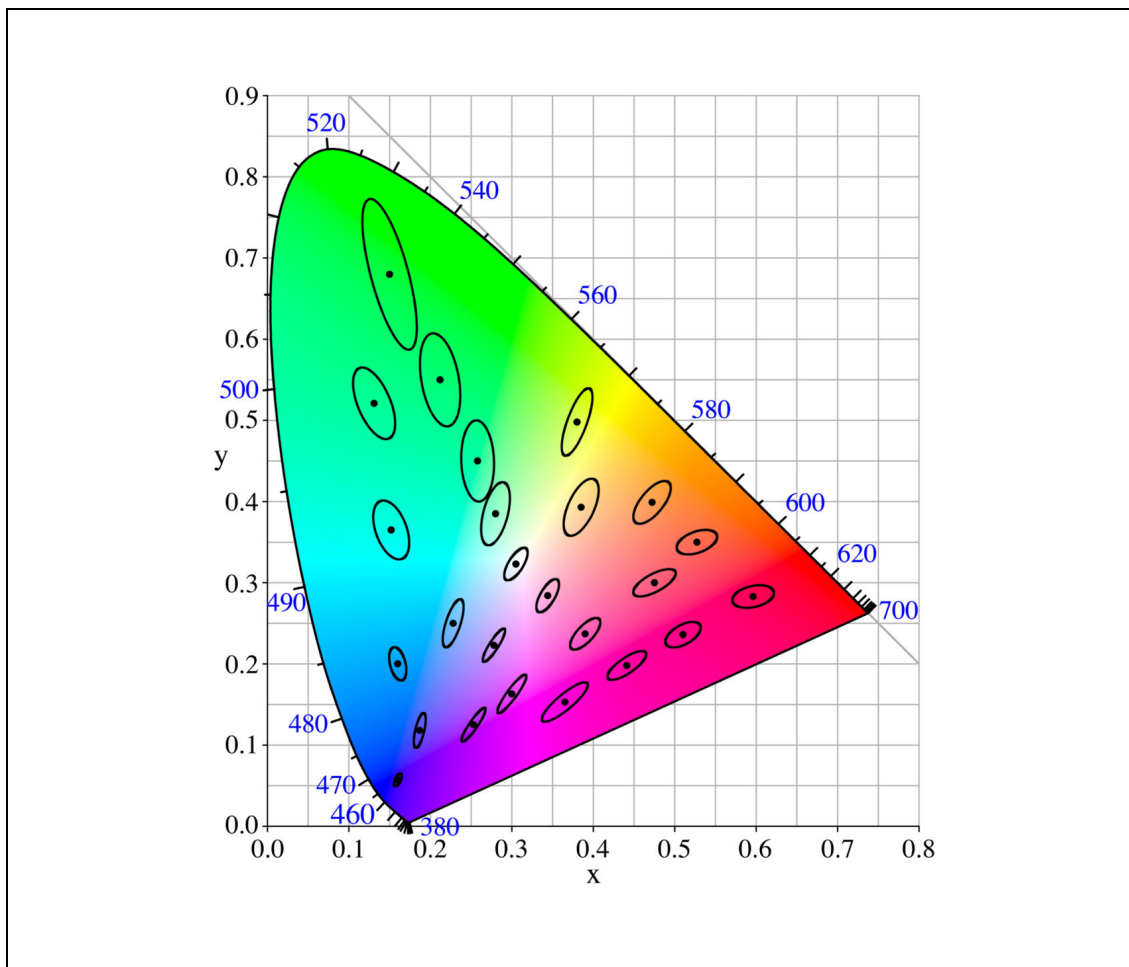
$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot \underline{y}(\lambda) \cdot d(\lambda)} \quad (20)$$

a činí tím hodnotu trichromatické složky Y absolutně odrážející difuzní plochy rovnou 100.



Obr. 28 Kolorimetrický trojúhelník CIE  $x, y$

Nevýhoda systému CIE spočívá v tom, že matematicky stejně velké odstupy uvnitř trojúhelníku nejsou lidským okem vnímány jako stejně velké. V oblasti modrofialové jsou i velmi malé matematické odstupy vnímány jako jasný rozdíl, zatímco v zelené oblasti (v horní části) jsou poměrně velké matematické odstupy sotva okem registrovány. Definice barevných odstupů byla zavedena Davidem McAdamem, kterým byl tento problém jako prvním rozpracován. Barevné rozdíly byly znázorněny formou elips. V prostorovém vyjádření, při zohlednění jasového vlivu, ve formě elipsoidů. Barvy jejichž souřadnice leží uvnitř těchto elips se jeví jako shodné. [12]



Obr. 29 McAdamovy elipsy

#### 4.2. $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ systém

Vedle barevného trojúhelníku CIE je používán v praxi nejčastěji systém  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vyvinutý v roce 1976 .

V tomto systému má hodnota :

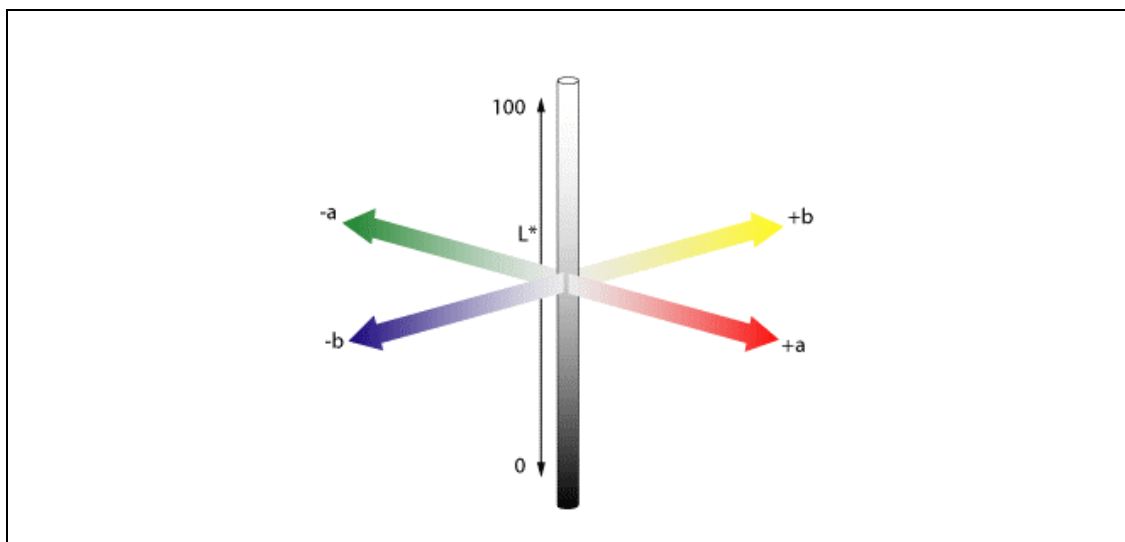
- $L^*$  polohu na jasové ose v rozsahu světlo-temno,
- $a^*$  - hodnota na ose červená-zelená
- $b^*$  - hodnota na ose modrá-žlutá.

Souřadnice  $L^*$   $a^*$   $b^*$  jsou vypočteny transformací trichromatických složek  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  z kolorimetrické soustavy CIEXYZ.

Přednost systému  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  proti barevnému trojúhelníku CIE je především v tom, že je přibližně vizuálně rovnoměrně odstupňován, tzn. že stejně vnímané barevné



rozdíly jsou interpretovány jako přibližně stejné geometrické vzdálenosti. Při výpočtu se zohledňují druhy použitého normovaného světla a pozorovací úhel.



Obr. 30 Schéma barevného prostoru CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$

$$L^* = 116Y^* - 16, \quad (21)$$

$$a^* = 500[X^* - Y^*], \quad (22)$$

$$b^* = 200[Y^* - Z^*], \quad (23)$$

$$\text{kde } X^* = \left(\frac{X}{X_0}\right)^{1/3} \quad \text{pro } \frac{X}{X_0} > 0,008856$$

$$X^* = 7,787\left(\frac{X}{X_0}\right) + 0,138 \quad \text{pro } \frac{X}{X_0} \leq 0,008856$$

$$Y^* = \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} \quad \text{pro } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856$$

$$Y^* = 7,787\left(\frac{Y}{Y_0}\right) + 0,138 \quad \text{pro } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856$$

$$Z^* = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{1/3} \quad \text{pro } \frac{Z}{Z_0} > 0,008856$$

$$Z^* = 7,787\left(\frac{Z}{Z_0}\right) + 0,138 \quad \text{pro } \frac{Z}{Z_0} \leq 0,008856$$

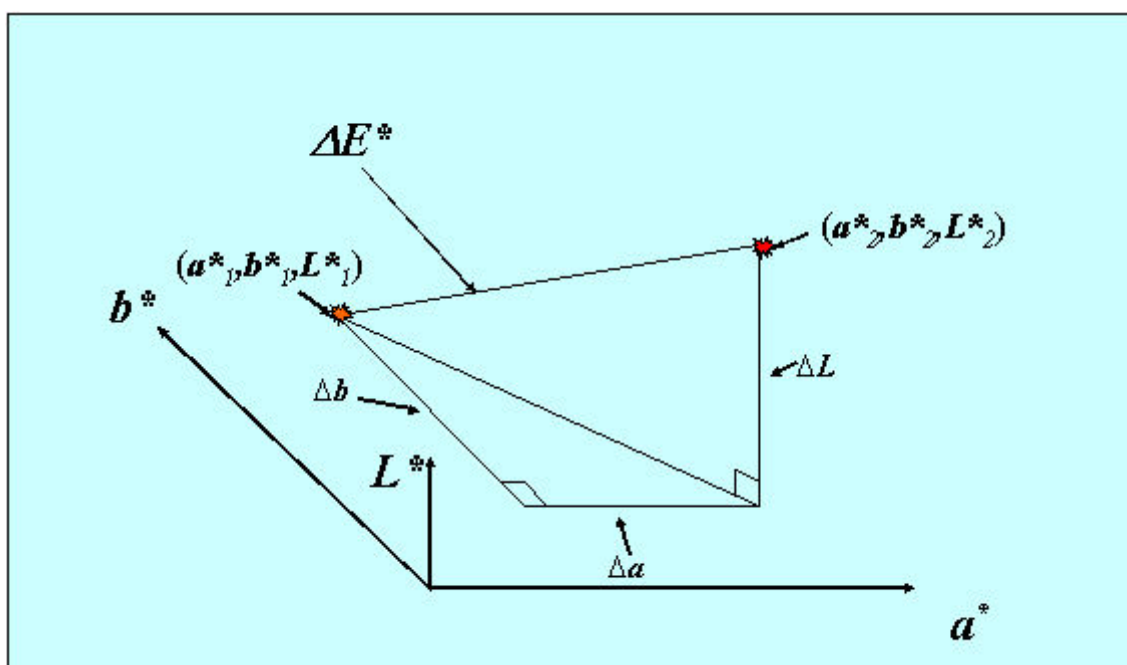
Z výše uvedených vztahů vyplývá, že rovnice CIELAB vyřešila problém malých hodnot trichromatických složek XYZ změnou troj-odmocninové transformace na lineární, čímž odstranila výskyt záporných hodnot měrné světlosti

#### 4.2.1. Barevná difference v systému CIE $L^*$ , $a^*$ , $b^*$

Barevný systém CIE  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  je vhodný pro definování barevné odchylky mezi dvěma předměty. Systém je také obzvlášť názorný pro subjektivní posouzení barevných rozdílů. Změna souřadnic na osách se označuje  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ . Z číselně vyjádřené změny je odvozován charakter změny (tmavší-světlejší, více-méně modré, více-méně červené apod.).

Vzdálenost dvou barevných bodů v barevném prostoru CIELAB se počítá prostorovou Pythagorovou větou ze tří parametrů barevné difference.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (24)$$



Obr. 31 Grafické vyjádření barevné změny v souřadnicích  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ .

#### 4.2.2. Rovnice barevných diferencí

Jak již bylo řečeno kolorimetrická soustava CIELAB je přibližně vizuálně rovnoměrně odstupňována. Nicméně je nutno uvést, že vizuální „stejnoměrnost“ této soustavy je udávána v poměru 1:4-7, což ve srovnání s kolorimetrickou soustavou XYZ, která je vizuálně nestejnoměrná v poměru 1:40, znamená řádově vyšší stejnoměrnost odstupňování. Na druhé straně lidské oko vnímá v bílé oblasti lépe barevné odstíny než v barevné oblasti. Například při opravách automobilů jsou v bílé oblasti DE\* tolerance 0,3 přípustné, v oblasti modré až tyrkysové je to 0,5, v zeleno-žluté 0,7 a v červené oblasti do hodnoty 0,9. Když nejsou barevné výrobky montovány přímo vedle sebe, lze hodnoty DE zdvojnásobit.

##### Rovnice CMC (l:c)

Rovnice CMC (l:c), která je počítána v prostoru CIELAB, je výsledkem řady testů, které v roce 1984 vedly k úpravě rovnice LPC79 (2.4.1).

$$\Delta E_{CMC(l:c)} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{l \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{l \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{S_H}\right)^2} \quad (25)$$

kde: pro  $L^* > 16$  je  $S_L = \frac{0,040975 \cdot L^*}{1 + 0,01765 L^*}$

pro  $L^* \leq 16$  je  $S_L = 0,511$

$$S_C = \frac{0,0638 \cdot C^*}{1 + 0,0131 \cdot C^*} + 0,638$$

$$S_H = S_C \cdot (T \cdot f + 1 - f)$$

$$f = \sqrt{\frac{(C^*)^4}{(C^*)^4 + 1900}}$$

$$T = 0,56 + [0,2 \cdot \cos(h + 168)] \quad \text{pro } 164^\circ \leq h < 346^\circ$$

$$T = 0,36 + [0,4 \cdot \cos(h + 35)] \quad \text{pro } 345^\circ \leq h < 164^\circ$$

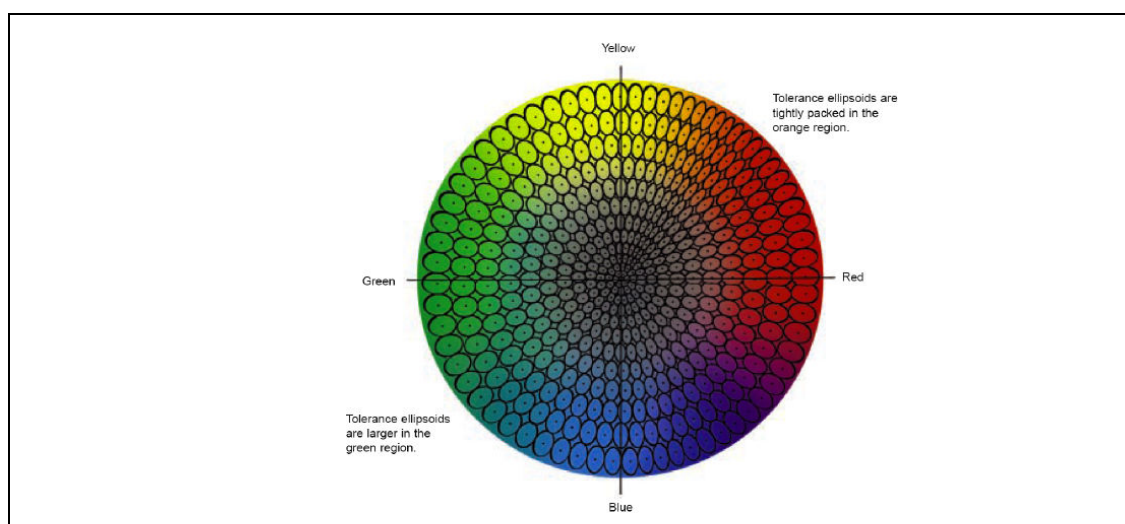
- T je řídicí poměr mezi  $S_C/S_H$  podle odstínového úhlu

- l, c jsou tzv. váhové faktory

Váhové faktory  $l$ ,  $c$  umožňují použití vzorce CMC ( $l:c$ ) pro různé účely. Testováním bylo zjištěno, že při volbě váhového faktoru  $l = 1$  a  $c = 1$  odpovídá  $\Delta E_{CMC}$  přibližně citlivosti lidského oka, tzv. perceptibility. Při volbě váhových faktorů  $l=2$  a  $c=1$  odpovídá  $\Delta E_{CMC}$  průmyslově akceptovatelným odchylkám, tzv. acceptability. Při vyhodnocování textilních vzorků obvykle nabývají váhové faktory  $l$  a  $c$  hodnoty 2:1 ( $l=2$  a  $c=1$ ).

V současnosti je se objevuje názor, že se hraniční citlivost oka pohybuje mezi 0,2 – 0,3  $\Delta E_{CMC}(l:c)$ .

Rovnice CMC ( $l:c$ ) byla v roce 1988 přijata jako BS 6923 (British Standard) akceptovaný i v dalších evropských zemích. V roce 1989 byl jako AATCC Test Method 173-1989 přijat i v USA. To mělo za následek sjednocení hodnocení průmyslových barevných odchylek mezi Evropou a USA. V roce 1994 byl tento vzorec přijat jako ISO standard, pod názvem ISO 105-J03.



Obr. 32 Toleranční elipsoidy CMC(2:1) v CIELAB prostoru [12]

Obrázek 32 znázorňuje, jak vzorec CMC ( $l:c$ ) bere v úvahu to, že lidské oko vnímá barevné difference u nepestrých odstínů podstatně silněji než u čistých odstínů. Důsledkem toho se toleranční elipsoidy směrem k spektrálně čistým odstínům zvětšují (směrem od achromatické osy  $L^*$ ) a naopak směrem k achromatické ose  $L^*$  se zmenšují. Toto přizpůsobování představuje hlavní přínos právě rovnice CMC ( $l:c$ )

## Rovnice CIE2000

Na základě diskusí o vlivu natočení tolerančního elipsoidu na predikční schopnosti rovnic pro výpočty barevných diferencí byla v roce 2000 přijata CIE norma pod označením / 173, 174 /. Podle této normy se výpočet barevné odchylky provádí ve 4 krocích, přičemž první krok zde není uveden, jedná se o výpočet barevných souřadnic v rámci barevného prostoru CIELAB.

### 2. krok : Výpočet $a'$ , $C'$ a $h'$

$$L' = L^* \quad (26)$$

$$a' = (1 + G)a^* \quad (27)$$

$$b' = b^* \quad (28)$$

$$C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad (29)$$

$$h'_{ab} = \tan^{-1}(b' / a') \quad (30)$$

kde

$$G = 0.5 \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^*}^7}{\overline{C_{ab}^*}^7 + 25^7}} \right) \quad (31)$$

kde  $\overline{C_{ab}^*}$  je aritmetický průměr měrné čistoty  $C_{ab}^*$  standardu a vzorku.

### 3. krok : Výpočet $\Delta L'$ , $\Delta C'$ a $\Delta H'$

$$\Delta L' = L'_b - L'_s \quad (32)$$

$$\Delta C'_{ab} = C'_{ab,b} - C'_{ab,s} \quad (33)$$

$$\Delta H'_{ab} = 2 \sqrt{C'_{ab,b} C'_{ab,s}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right) \quad (34)$$

$$\text{kde } \Delta h'_{ab} = h'_{ab,b} - h'_{ab,s} \quad (34)$$

#### 4. krok : Výpočet CIEDE2000 = $\Delta E_{CIE2000}$

$$\Delta E_{CIE2000} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)} \quad (35)$$

kde

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}}$$

a

$$S_C = 1 + 0.045 \overline{C'_{ab}} \quad (36,37)$$

a

$$S_H = 1 + 0.015 \overline{C'_{ab}} T$$

kde

$$T = 1 - 0.17 \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\overline{h'_{ab}}) + 0.32 \cos(3\overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\overline{h'_{ab}} - 63^\circ)$$

a

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C \quad (38)$$

kde

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\left(\overline{h'_{ab}} - 275^\circ\right)/25\right]^2\right\}$$

a

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\overline{C'_{ab}}^7}{\overline{C'_{ab}}^7 + 25^7}} \quad (39)$$

V současné době probíhá postupná implementace této rovnice do software a zároveň s tím i její intenzivní testování.

## 5. Kalibrace monitoru

### 5.1. Kalibrace a zobrazení barev různými zobrazovacími systémy

Kalibrace podle slovníku cizích slov znamená vyvážení. U počítačových systémů se jedná o vyvážení barev tak, aby barvy zobrazované na monitoru odpovídaly realitě, tj. vstupu i výstupu. Kalibrace těchto zařízení se obvykle provádí pomocí ICC (International Color Consortium) profilů což jsou univerzální standardy pro barevné profily zařízení.

Základní myšlenka implementace ICC je založena na schopnosti změřit objektivně barvu v barevném prostoru a možnosti přiřadit jí v tomto prostoru její souřadnice.

Proměřením vstupního a výstupního zařízení dokážeme odvodit jeho ICC profil. Ten popisuje, jakým způsobem zařízení objektivní barvy snímá nebo zobrazuje. ICC profily zpětně říkají systému CMS (Color Management System - správa barev), jak objektivní barvu na výstupu co nejpřesněji simulovat a jak správnou objektivní barvu naopak ze vstupních dat získat.

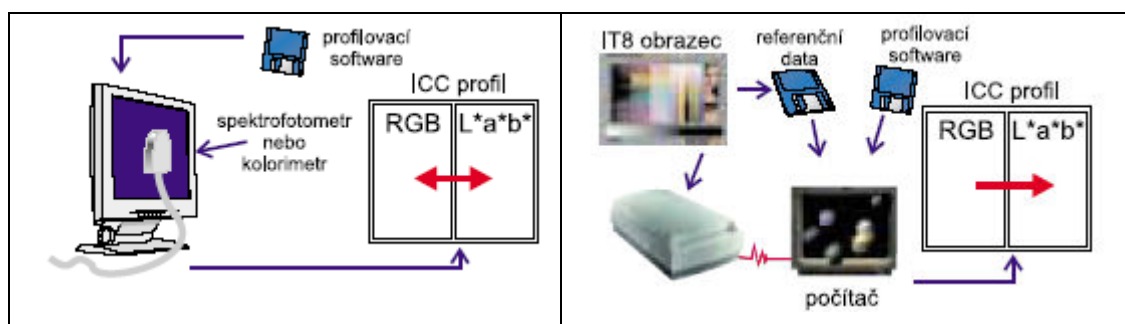
Systémy řízení jsou v současnosti zabudovány do obou hlavních platforem, tedy Windows na PC i MacOS na počítačích Apple. Prakticky pro všechna hromadně prodávaná grafická zařízení (monitory, tiskárny, skenery apod.) jsou ICC profily celkem běžně k dispozici. Nalezneme je na [www](http://www) stránkách výrobců, dostaneme je s graficky orientovanými programy. Tyto profily ale nejsou dělány pro každé zařízení samostatně, ale jsou to hromadné profily pro celou sérii. Přitom profil má popisovat vlastnosti konkrétního zařízení. Proto se v praxi proměřují a generují profily pro každý konkrétní exemplář.

Kromě ICC profilů se můžeme setkat i s profily, jako jsou Generic CMYK, Generic RGB apod. Speciálně profil monitoru musí být sestaven tak, aby umožnil převody oběma směry. Jako výstupní zařízení se monitor chová při zobrazování nasnímané předlohy a jako vstupní zařízení se chová, slouží-li jako předloha pro tisk, nebo při míchání nových odstínů barev.

ICC profil monitoru je generován prostřednictvím vhodného softwaru na základě výsledků měření (spektrofotometrem apod.). Vstupní zařízení, jsou především skenery a

digitální fotoaparáty (kamery). Pro tato zařízení je možné vystačit s měřícím obrazcem a příslušným softwarem, další přístroje již nejsou třeba.

U skenerů je třeba rozlišovat mezi typy s výstupem v RGB a CMYK. Generování ICC profilu se provede naskenováním měřícího obrazce a zbytek se provádí softwarově. U digitálních fotoaparátů a kamer je situace složitější, protože pracují ve velmi rozdílných světelných podmínkách. Vliv okolního osvětlení není možné zanedbat, výsledný ICC profil je okolním světlem podstatně ovlivněn.



Obr. 33 Vytváření profilů

Pro tvorbu profilu je stálost parametrů v čase (resp. během práce na rozsáhlejší zakázce) klíčová - pro nestabilní zařízení nelze vytvořit věrohodný profil. Hlavní překážkou přesnosti je příliš mnoho vzájemně se ovlivňujících parametrů.

### 5.1.1. Kalibrace sondy

Způsob kalibrace sondy je závislá na typu kalibrační sondy, obecně je princip obdobný jako u klasického spektrofotometru. Rozdíl je v tom, že standardy tvoří samotný monitor. Software určený pro kalibraci monitoru zobrazí kalibrační barevné standardy a porovnává je s naměřenými hodnotami přímo na sondě. Nastavení monitoru pak probíhá softwarově a to úpravou výstupní tabulky LUT (Look Up Table) u grafické karty, nebo je-li k dispozici hardwarová podpora ,např. u moderních LCD panelů, přímo na monitoru je nastavení realizováno přímo bez nutnosti kompenzace na grafické kartě.





*Obr. 34 Ukázka kalibračních sond na monitoru*

### **5.1.2. Kalibrace monitoru**

Protože data jsou upravována ve zvoleném pracovním prostoru aplikace, je kontrola provedených korekcí závislá na správné simulaci barev v prostoru barev reprodukováných monitorem. Při kalibraci monitoru je cílem přiblížit se k těm standardizovaným prostorům (respektive k jejím parametrům gama a nastavení teploty bílé), u kterých se předpokládá, že na obrazovce budou simulovány.

Základní úpravy parametrů monitoru se vztahují na jas, kontrast a pokud možno i na nastavení teploty bílého bodu. Pomocí těchto tří parametrů se snažíme uvést monitor do takového stavu, abychom dosáhli potřebných výchozích podmínek pro reprodukování. Při simulaci barev obrazových dat je přesnost mezi vstupem a výstupem (v tomto případě reprodukování na obrazovce monitoru) závislý na míře zachování těchto parametrů.

Všechny tři parametry (jas, kontrast a teplota bílého bodu) ovlivňují jasový a tedy i barevný rozsah a průběh uvnitř gamutu monitoru. Nastavením jasu a kontrastu korigujeme vyšší gamu monitoru a její výsledná hodnota ovlivňuje přesnost v zobrazení. Jakékoli reprodukování obrazových dat může být doprovázeno nárůstem jasu či denzity (podle druhu výstupu), který je popsán gama křivkou. Ta je vždy použita pro korekci hodnot mezi různými prostory barev a popisuje nelineárnost poměru hodnot na

vstupu a na výstupu. Pokud je známa charakteristika gamy prostoru výstupu (při tisku jde o nárůst tiskového bodu), je potřeba si přizpůsobit v editoru, vhodný pracovní prostor. Pokud by gama pracovního prostoru byla od prostoru výstupu příliš odlišná, došlo by v jedné části jasu (buď ve světlech nebo stínech) ke znatelnému úbytku odstínů.

Při tvorbě samotného profilu se už rozsah barev zařízení nemění. Profil jen popisuje barvy na vstupu a výstupu vůči prostoru **CIE XYZ**. Mimo nastavení samotného monitoru je možné ovlivnit zobrazení v systému nastavením hodnot v tabulce LUT (Look Up Table) grafické karty. V tomto případě profil popisuje prostor barev dosažený v nastavení LUT.

### 5.1.3. Kalibrace monitoru CRT

Prostor barev dosažitelný na CRT monitoru by měl reprodukovat nejširší spektrum barev a není záměrem při kalibraci omezit jeho rozsah na pracovní prostor či prostor výstupního zařízení, se kterým budeme pracovat. Abychom mohli pracovní prostor porovnat s celým rozsahem barev zobrazitelných na monitoru, je nutno tento prostor popsat ICC profilem. Profil monitoru je používán nezávisle na zvoleném pracovním prostoru a při reprodukování obrazu jsou data do jeho prostoru přepočítávána. Na kalibraci se využívá kalibračních sond. Bez pomoci měřicí sondy je velmi nesnadné odhadnout ideální nastavení parametrů monitoru.

Omezí-li se kontrast, změní se intenzita jasu **R**, **G** a **B** luminoforu. Při pokusech o nejideálnější nastavení monitoru by měl být kontrast snižován od maximální hodnoty. Většinou kontrast není potřeba výrazně upravovat, pokud nenastane problém se zobrazením rozdílů ve světlých tónech. Při kalibraci je potřeba si vyzkoušet, jak reagují tmavé odstíny na změnu v nastavení jasu. Zvýšením jasu se tmavé odstíny budou více přesouvat do oblasti světlejších tónů.

Kalibraci zakončíme u nastavení teploty bílého bodu. Pro docílení určité teploty bílého bodu je potřeba změnit poměry mezi vyzařováním luminoforů. V hardwaru monitoru proběhne snížení intenzity jasu na luminoforech produkujících modrou a zelenou, tím dosáhnete nižší teploty, získáte teplejší odstín bílé (nejsvětějšího bodu) a zároveň i teplejší odstíny v neutrálních tónech. Bílá na monitoru je při hodnotě 9300 [K] o poznání jasnější než při hodnotách nastavených na 6500, 5500 nebo 5000 [K].

Gama o hodnotách kolem 2,5 je charakteristická pro CRT monitory. Pro zamezení přepočtů degradujících obraz je gama přizpůsobována hodnotě 2,2. Při kalibraci monitoru je třeba gamu na tuto hodnotu snížit. Zmíněné hodnoty vychází z nastavení zobrazení v systému přes videokartu a lze ji chápat jako kompromis mezi parametry nastavené na monitoru a parametry výstupního prostoru.

Pokud je známa gama, je znám i průběh převodní křivky ukazující transformaci vstupních hodnot na výstupní. Podle hodnoty gama lze obrazová data přizpůsobit těmto změnám již při digitalizaci obrazu. Později provedené korekce, prováděné při přepočtech mezi ICC profily, mohou citelně zasáhnout do vzhledu barev. Gama korekce uváděná u ICC profilů (kdy gama není rovna 1) popisuje nelinearitu výstupu. Podle hodnoty gamy obrazových dat lze kompenzovat hodnotu gama výstupu. Při rozdílnosti gama hodnoty v ICC profilu výstupu budou data upravena podle profilem daných parametrů. A pokud není známa výstupní gama nebo srovnávací tabulka hodnot výstupu, nemá pak hodnota vstupní gamy na výstupní data žádný vliv.

#### **5.1.4. Kalibrace panelu LCD**

Kalibrace probíhá obdobně jako u CRT s tím rozdílem, že se využívá spektrometru, který je díky svému principu měření, jako jediné zařízení schopný kalibrovat LCD displeje. Je to způsobeno použitou technologií tekutých krystalů. Ty vyzařují světlo jen v nespojitých spektrálních čarách. V současné době se začínají vyrábět i panely s tzv. „hardwarovou kalibrací“. Hardwarově kalibrovatelné panely jsou propojeny s počítačem přes USB kabel, nově se často používá i možnost ovládat monitor signály, vedenými po videokabelu. Je otázkou konkrétní konstrukce panelu, jaké funkce a parametry monitoru dokáže aplikace nastavit. Přesná podoba výrazně závisí na konkrétním hardwaru monitoru.

#### **5.1.5. Kalibrace Skenerů**

Kalibrace skeneru je založena na tvorbě jeho ICC profilu. ICC profil skeneru je jednosměrný, převádí obrazová data z prostoru skeneru, což jsou nejčastěji RGB data, do nejčastěji používaného **CIE  $L^*a^*b^*$**  prostoru. Profil může být založen buď na rovnicích nebo na LUT (Look Up Table), obsahující pouze vybrané hodnoty, mezi nimiž se v případě potřeby provádí interpolace. Generování profilů pro skenery je z

určitého pohledu snazší než u ostatních zařízení a to proto, že nejsou zapotřebí žádná další měřicí zařízení. Do skeneru jednoduše vložíme měřicí obrazec (odrazný nebo dia) a provedeme sken. O vše ostatní se, teoreticky, postará programové vybavení pro správu a tvorbu profilů. A protože zná přesné barevné hodnoty jednotlivých políček na měřicím obrazci, může vygenerovat příslušný ICC profil.

Skenery se nastavují podle jejich schopnosti reprodukovat **RGB** nebo **CMYK**. Dokáže-li skener produkovat **RGB** data přímo, je nutné při vytváření a používání ICC profilů respektovat následující zásady:

- nastavit hodnoty bílého a černého bodu na maximální hodnoty,
- vytvořit opět tónovou křivku s více detaily ve stínech,
- vypnout všechny barevné korekce a převodní tabulky,
- vypnout všechny automatické funkce (kontrast atp.).

Nastavení pro CMYK skenery jsou určeny tyto postupy:

- zkontrolovat, jestli náhodou nelze veškeré převody do **CMYK** vypnout a získat RGB data přímo (vyhnete se tak následným převodům),
- vyrovnat šedou (musí být neutrální) pomocí **C**, **M** a **Y** signálů,
- vypnout GCR, UCR a UCA tak, aby CMY tvořily 100 % v černé,
- nepoužívat žádné barevné korekce ani převodní barevné tabulky,
- vytvořit tónovou křivku, s důrazem na více detailů ve stínech než je normální nastavení,
- uložit sejmutý obraz jako TIFF CMYK. To je důležité, neukládat data jako RGB, převod provádět pomocí příslušného programu.

Převod ze **CMYK** do **RGB** se řeší softwarově

#### 5.1.6. Kalibrace digitálních fotoaparátů a kamer

Kalibrace digitálních kamer a fotoaparátů je založena opět na vytváření ICC profilů které jsou v mnohém podobné tvorbě profilů pro skenery. Podstatný rozdíl je ale v tom, že obrazy snímané fotoaparátem jsou pořizovány za velmi různorodých světelných podmínek. Digitální kamera navíc snímá, narozdíl od skeneru, reálný obraz skutečnosti, tj. celé spektrum viditelných barev. Problém světelných podmínek při

snímání se řeší podobně jako problém simulace osvětlení předlohy. Profil digitálního fotoaparátu se vytvoří jen pro jeden typ osvětlení. Dále je nutné matematicky určit převodní vztahy pro změnu profilu při změně osvětlení. A má-li vše fungovat, je nutné znát parametry osvětlení v okamžiku expozice a pak lze potřebné propočty provádět.

Prakticky se profil vytváří z hodnot vyfotografovaného kontrolního obrazce obdobně jako u skeneru, není potřeba další měřicí přístroj. Stejně jako u ostatních zmiňovaných přístrojů a zařízení rovněž platí, že spíše než absolutní hodnoty chyby (barevného posunu) fotoaparátu je důležitá přesnost a opakovatelnost (stabilita) parametrů; důležitý je i dostatečný gamut fotoaparátu.

## *Experimentální část*

### **6. Popis experimentu**

#### **6.1. Popis pracoviště**

Experiment probíhal v laboratoři měření barevnosti a vzhledu na katedře textilních materiálů. Osvětlení pracoviště bylo voleno tak, aby odpovídalo normě ČSN 01 17 18.

Před testovací monitor byla umístěna fixační lavice, na které byla umístěna měřicí sonda kalibračního kolorimetru. Na vrchní části fixační lavice byla umístěna podložka, pomocí které byla fixována poloha obličeje testované osoby.

#### **6.2. Použité zařízení**

Pracoviště (obrázek 35) bylo složeno z počítače se dvěma monitory – testovacího a ovládacího. Testovací monitor má označení EIZO COLOR GRAPHIX CG21, ovládací monitor Acer MM17T.

Monitory používaly grafickou kartu Matrox Parhelia 128MB.

Software použitý pro vizuální testy byl komerčně dostupný program Datacolor ENVISION PRO.

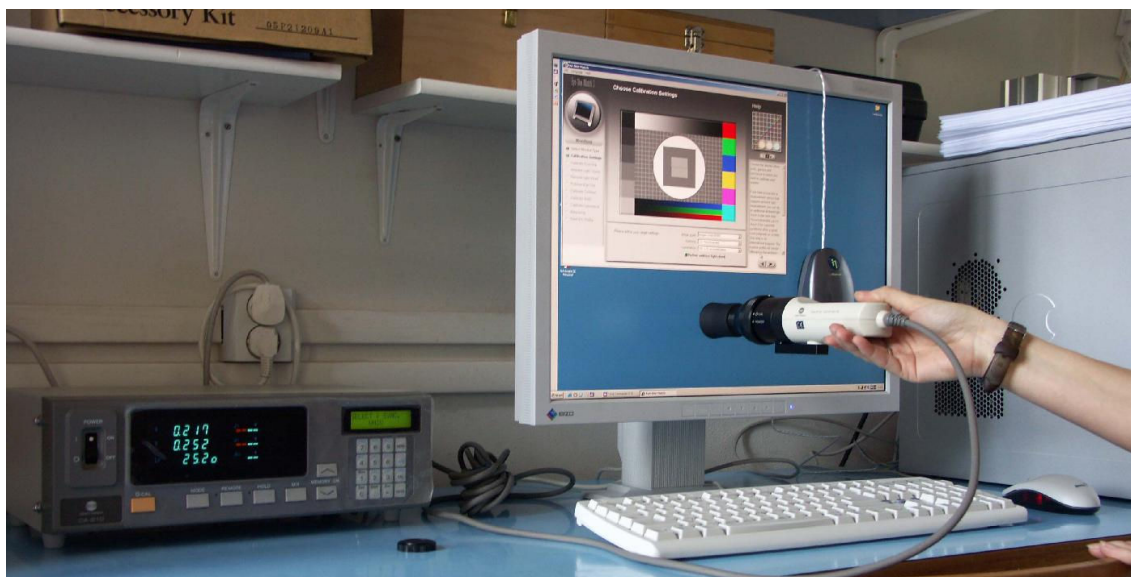


*Obr. 35 Pracoviště*

### 6.2.1. Kalibrace použitého zařízení

Základní kalibrace byla prováděna sondou SPYDER 2 od firmy Datacolor. Tato kalibrace je součástí použitého měřicího softwaru Envision a umožňuje jednak tzv. naprofilování barevného monitoru, což představuje omezený objektivní barevný prostor, který lze příslušným monitorem zobrazit. Zároveň s nastavením profilu monitoru je nastavováno i odstupňování, které následně odpovídá kolorimetrické soustavě CIELAB. Díky tomuto nastavení je možné používat softwarové ovládání jednotlivých barev zobrazovaných monitorem bez nutnosti souběžného měření doprovodnou měřicí sondou. Nicméně v rámci experimentu byla provedena ověřovací kalibrace. Ověření kalibrace a kontrola barevného podání testovaného monitoru byla prováděna pomocí měřicího systému firmy MINOLTA s označením COLOR ANALYZER CA210.

Zároveň s výše uvedenou kalibrací byla sledována dlouhodobá schopnost monitoru zobrazovat předem určené barvy tak, že rozptyl naměřených hodnot se v průměru pohyboval okolo  $0.04 \Delta E^*$ . Tato variabilita je dostatečně nízká pro to, aby bylo výše uvedené zařízení používáno pro sledování hraniční citlivosti lidského oka vůči barevným rozdílům, neboť je obecně známo, že hraniční citlivost lidského oka se pohybuje okolo  $0.2$  až  $0.4 \Delta E^*$ .



Obr. 36 Kalibrace

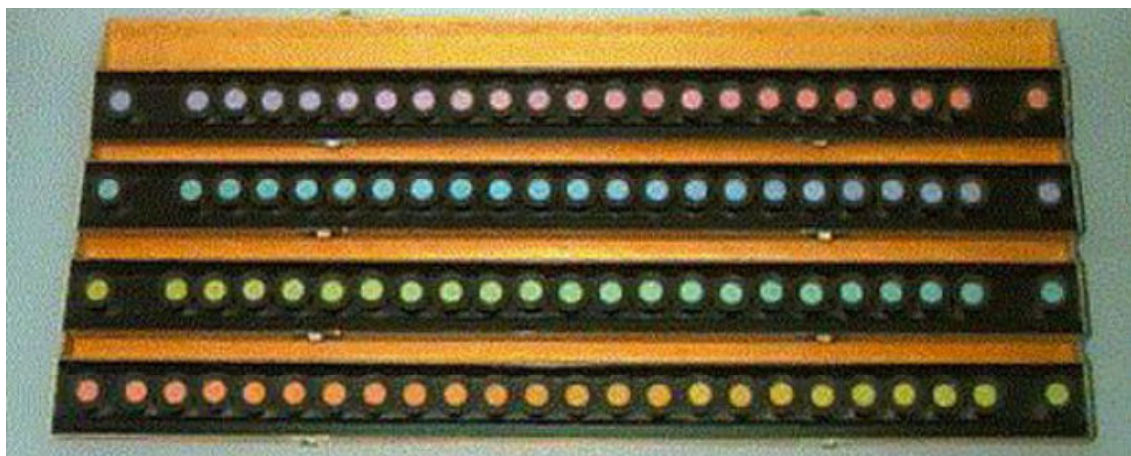


### 6.3. Popis měřených pozorovatelů

Pozorovatele byli vybráni jako průřez všech věkových skupin obou pohlaví. Cílem výběru bylo to, aby bylo i při malém počtu pozorovatelů dosaženo co největší komplexnosti experimentu. Je nutno si uvědomit, že navržený experiment předpokládal vysoký počet individuálních posudků – v našem konkrétním případě byl předpokládán počet posudků cca 1000 s tím, že čas potřebný na jeden posudek by se měl pohybovat okolo pěti minut (což představuje cca 85 hodin čistého experimentálního času bez potřebných příprav ke kalibraci). S ohledem na dostupnost testovacích osob měli muži ve skupině menší zastoupení než ženy. Pro podrobnější testování dvou osob byla vybrána žena a muž.

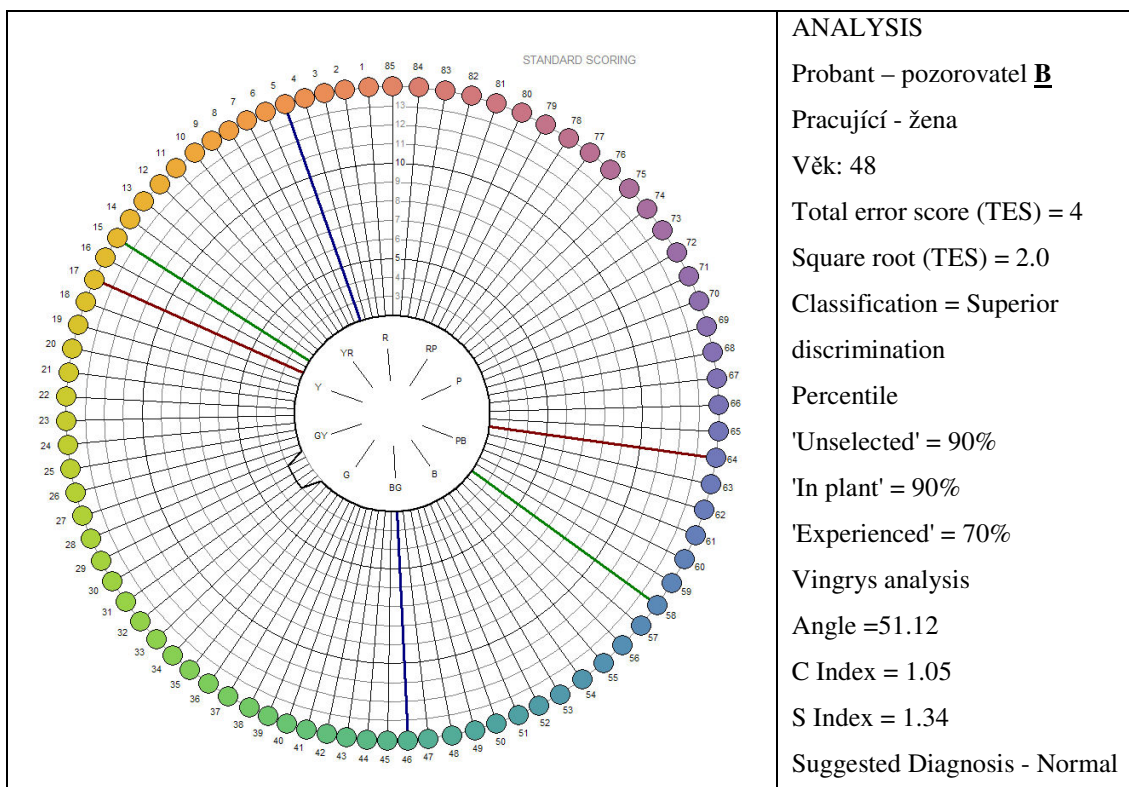
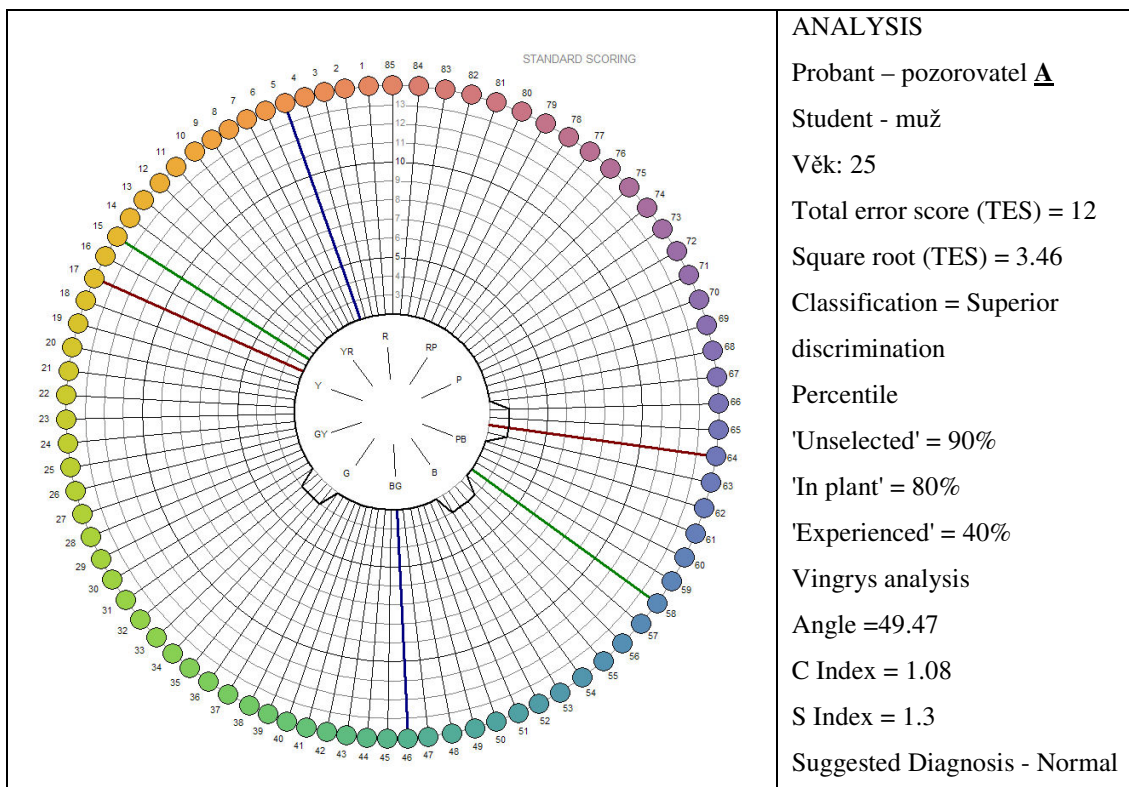
Následují profily jednotlivých osob s detaily a výsledkem Farnsworth –Munsell 100 Hue testu. Tento test složí k prověřování lidí z hlediska schopnosti rozlišovat jednotlivé barvy. Narozdíl od tzv. pseudoizochromatického Ishiharova testu, který se v omezené podobě používá ve formě barvocitových tabulek, představuje přesnější metodu měření citlivosti pozorovatelů z hlediska hodnocení barev.

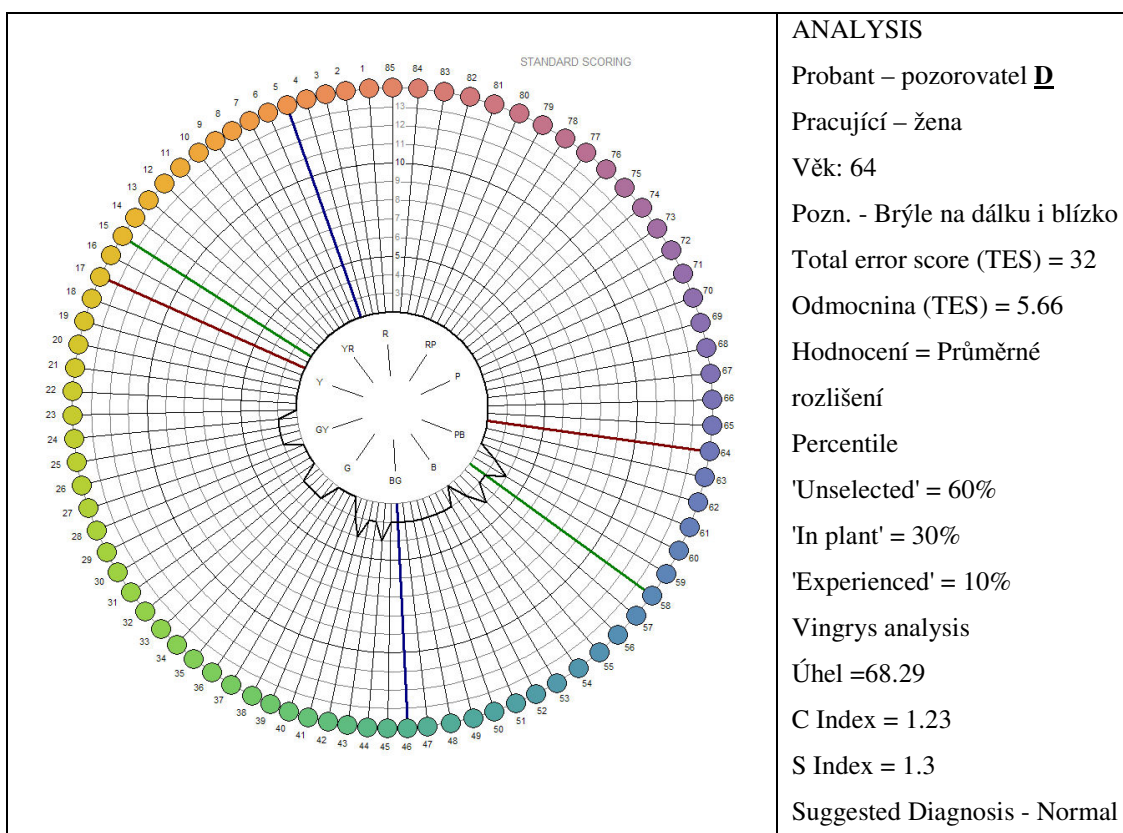
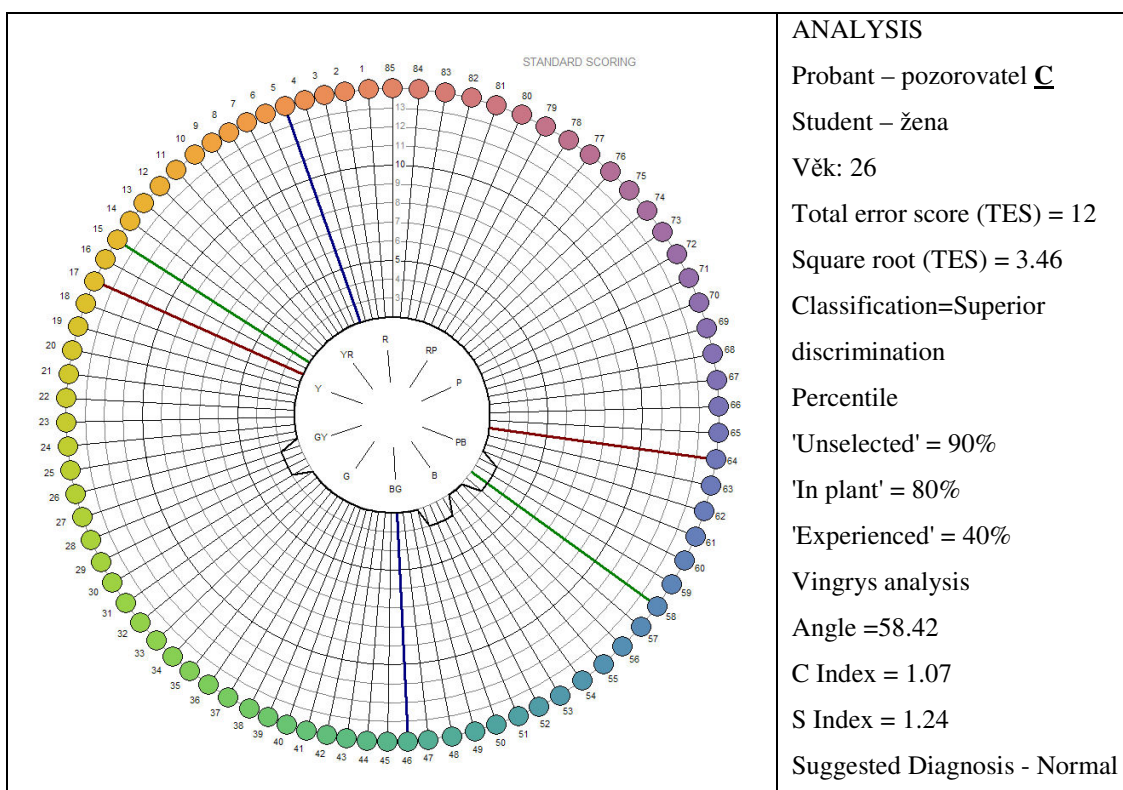
Tento test byl prováděn v koloristické skříni Judge 2 firmy Gretag Macbeth při simulaci denního osvětlení D65. Test se skládá z 84 barevných vzorků. Vzorky jsou umístěny ve čtyřech testovacích sadách, jak je vidět na obrázku 37. Úkolem hodnocené osoby je srovnat tyto vzorky do přirozených posloupností mezi dvěma krajními odstíny. Výsledkem testu, který je počítán pomocí doprovodného softwaru, je odhad zařazení jednotlivých testovaných osob do různých kategorií hodnotitelů (vynikající rozlišování barev, průměrné rozlišování barev, nerozlišování barev, eventuálně chyby barvocitu).



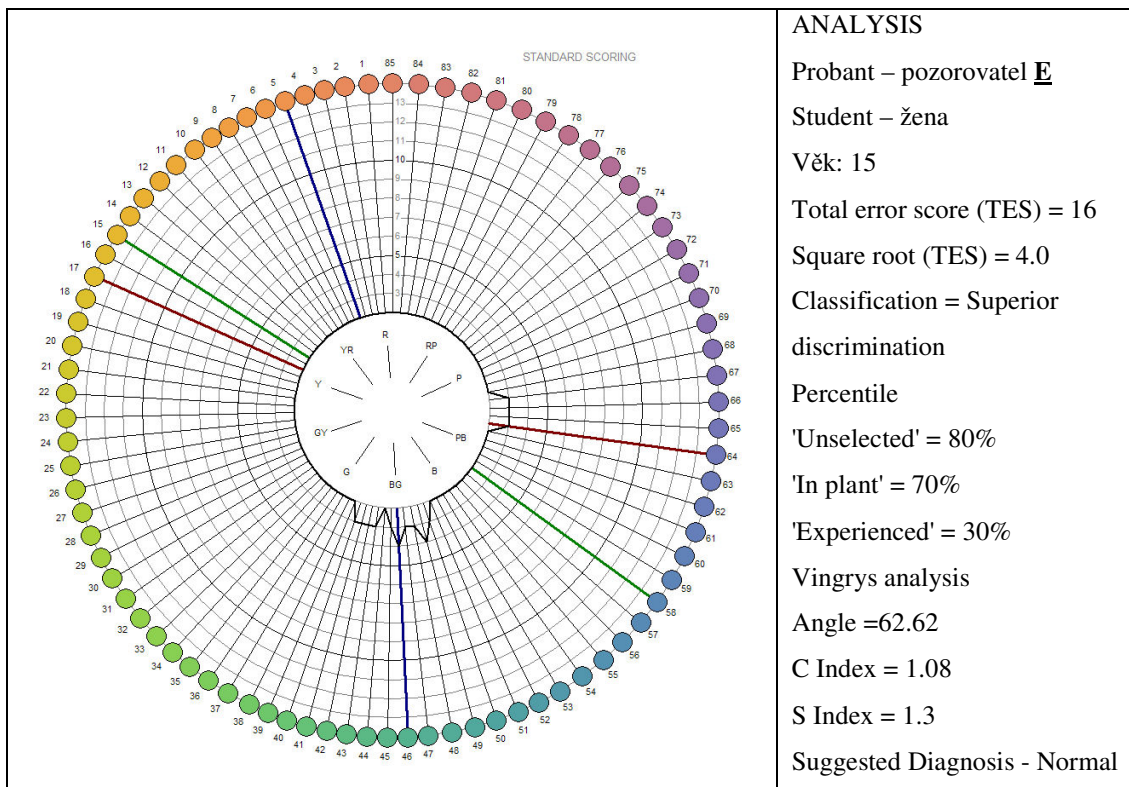
Obr. 37 Farnsworth –Munsell 100 Hue test.











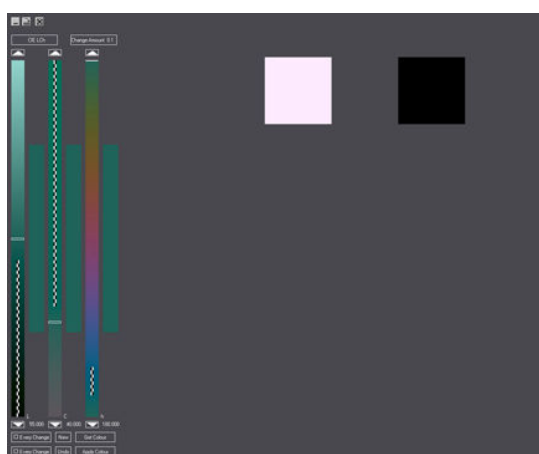
#### 6.4. Průběh experimentu

U ovládacího monitoru pracovník řídící experiment prováděl změny parametrů barev. Před testovacím monitor byl posazen měřený pozorovatel. Poloha pozorovatele byla definována pomocí opěrky hlavy. Ta byla nastavena tak, aby pozorovací úhel pozorovatele odpovídal tzv. CIE doplňkovému pozorovateli, tj. 10° pozorovateli.

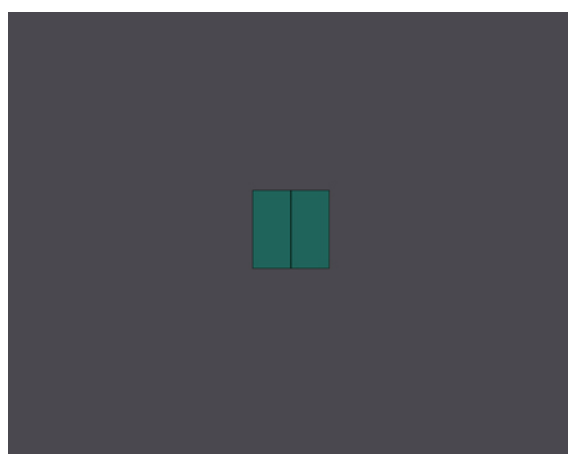


Obr. 38 Měření pozorovatele

Na počátku experimentu byly obě dvě části dvoudílného testovacího pole (v našem případě barevné obdélníky), stejně barevná, neboli objektivně zjištěná barevná odchylka byla rovna nule. Řídící osoba pomocí ovládacích posuvníků na pracovním - řídicím monitoru (obrázek 39) měnila zabarvení levé části dvoudílného zorného pole vždy v jednom ze šesti směrů měřených barevných atributů. Testované barevné atributy byly v souladu s kolorimetrickou praxí, měrná světlost  $L^*$ , měrná čistota  $C^*$  a měrný odstínový úhel  $h^\circ$ . Pozorovateli byly postupně předkládány vzorky o různých barvách a měli za úkol informovat osobu řídící experiment o okamžiku, kdy zpozorovali barevný rozdíl vznikající mezi dvěma částmi testovacího zorného pole. Tímto způsobem byly získány hraniční hodnoty citlivosti testovaných osob pro kladnou i zápornou změnu testovaných kolorimetrických atributů - byly naměřeny plus - minus hodnoty hraničních citlivostí pro  $L^*$   $C^*$   $h^\circ$ .



Obr. 39 „Řídící“ monitor



Obr. 40 „Testovací“ monitor

Na obrázcích 39 a 40 je ukázáno zobrazení při měření na řídicím monitoru a testovacím monitoru. Jednotlivé konfigurace uspořádání testovaných vzorků a pozadí jsou uvedeny v příloze.

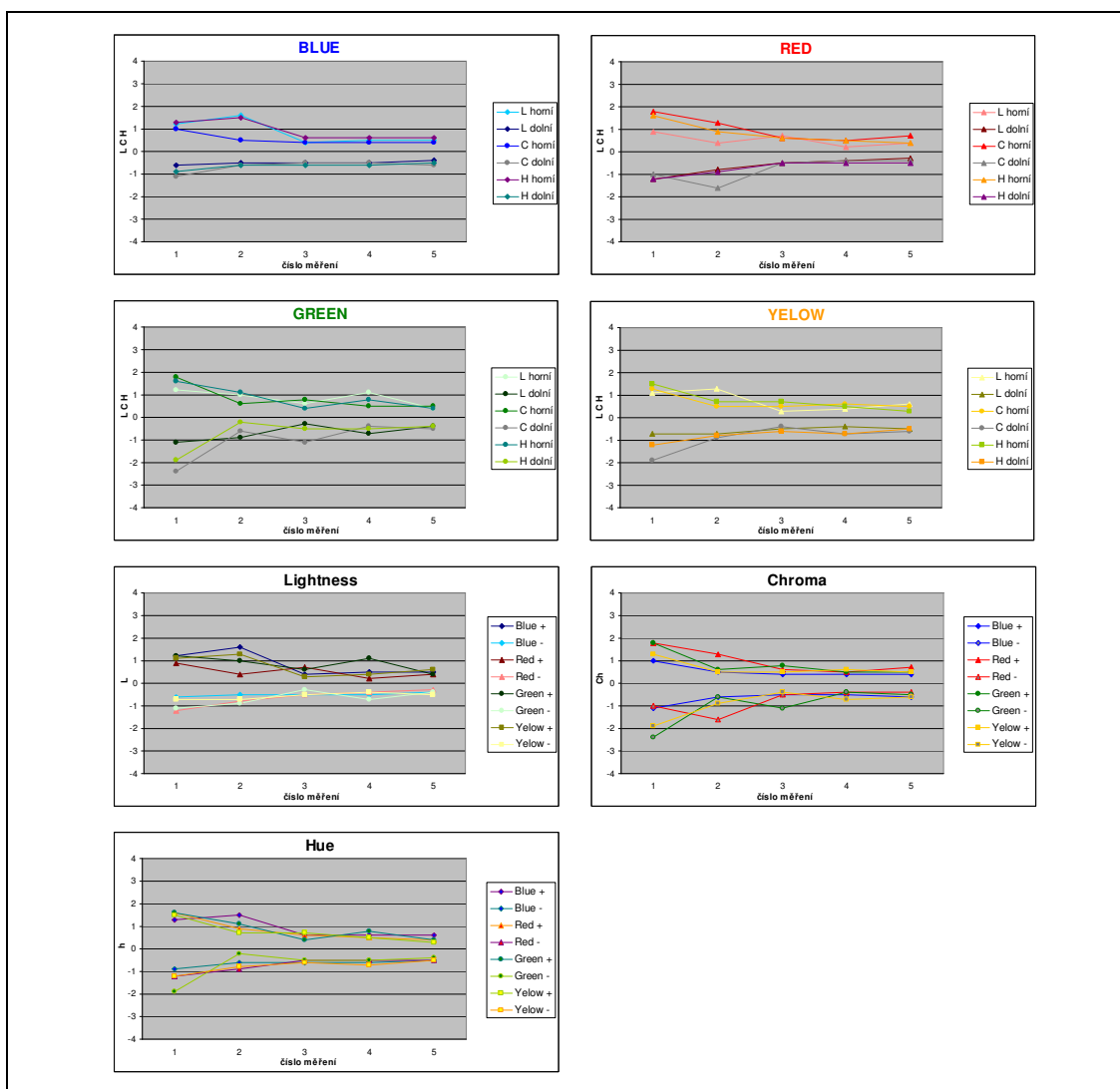
Vzhledem k časové náročnosti byl pro detailní test citlivosti vůči barevným rozdílům ovlivněným tzv. blízkým pozadím testování pouze dva pozorovatelé, a sice muž a žena.

## 7. Výsledky experimentu

### 7.1. Testování citlivosti skupiny pozorovatelů

Na zjištění citlivosti k vnímání barevných rozdílů byla testována skupina pěti pozorovatelů, testování proběhlo postupně pětikrát za sebou s rozestupem 3-5 dní mezi jednotlivými testy. Záznam dat z měření citlivosti byl pro všech pět pozorovatelů zpracován a porovnáván dvěma způsoby:

- zpracování, kde z plus minus hodnot hraničních citlivostí pro  $L^* C^* h^\circ$  pro každého pozorovatele jsou čtyři grafy pro čtyři měřené barvy (modrou, červenou, zelenou, žlutou), a dále tři grafy pro základní atributy barev (graf pro světlost, čistotu, odstín). Příklad zpracování výsledku pro jednu osobu vidíme na obrázku 41.



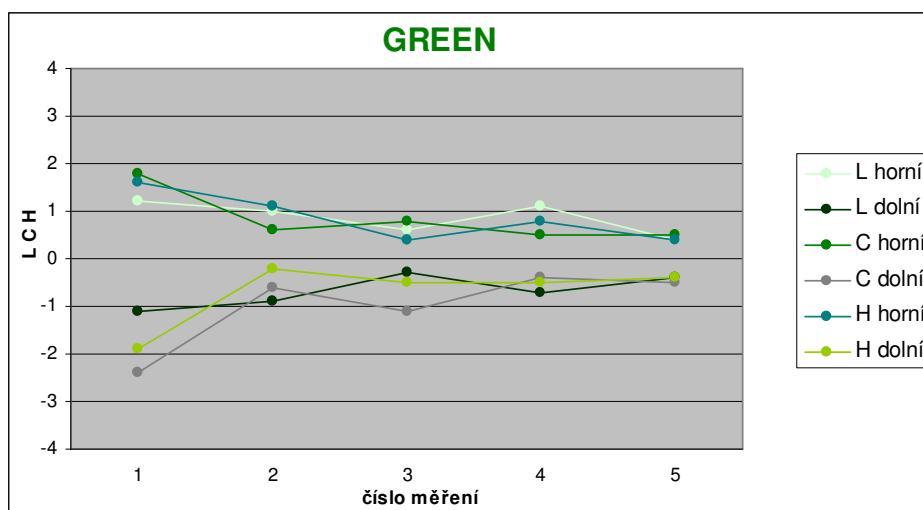
Obr. 41 Náhled výsledků experimentu, data pozorovatelky **B**

- grafy, které zobrazují MacAdamovu hraniční citlivost (FMC2 – modrá elipsa) vůči barevným rozdílům a průmět diskriminačního elipsoidu (červená elipsa) .

### 7.1.1. Znázornění výsledků pomocí odchylek od nominálních

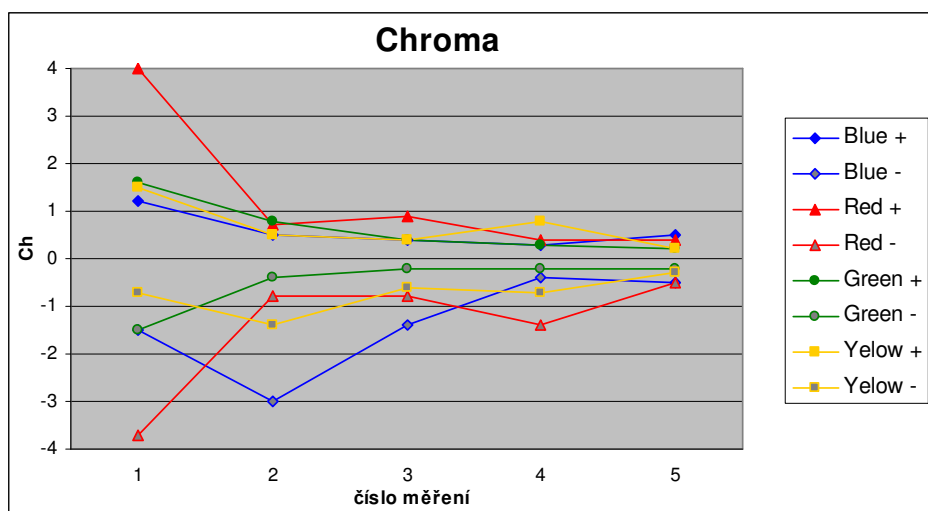
U čtyř z pěti pozorovatelů byla během pěti měření zjištěna adaptace pozorovatele na zvyšující se zatížení pro rozpoznávání barevného tónu, čistoty a světlosti. Obrázky 42 a 43 dokumentují příklady průběhu zpřesňování posudku pozorovatelů během zaznamenaných pěti měření.

Na obrázku 42 je patrné zlepšování výsledků jako důsledek adaptace oka pozorovatelky **B** na grafu pro zelenou barvu, kde je v jednotlivých křivkách zřetelné výrazné zlepšení rozlišovací schopnosti v základních třech attributech barvy - ve světlosti (na obrázku jako L horní, L dolní,) čistotě (na obrázku jako C horní a C dolní), a odstínu (na obrázku jako H horní a H dolní).



Obr. 42 Průběh zpřesňování posudku pozorovatelky **B** během experimentu

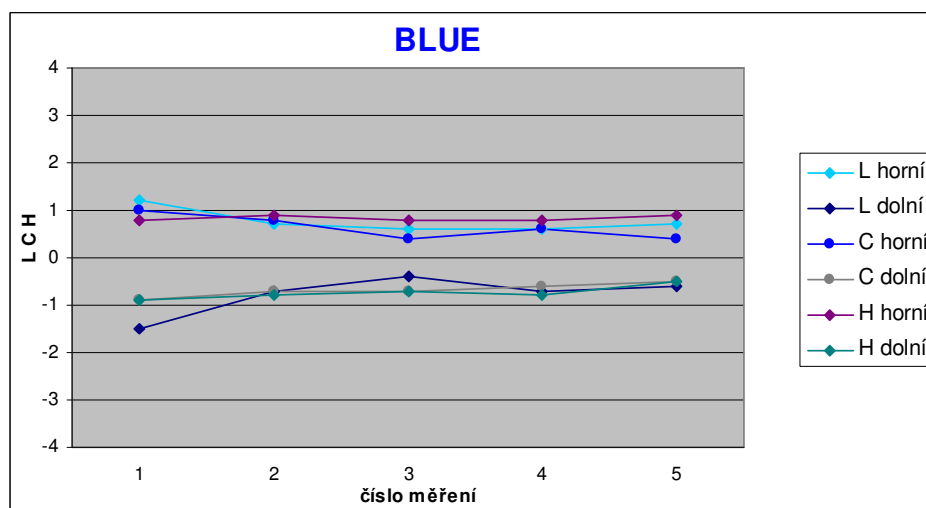
Stejným způsobem je zaznamenán efekt učení se pozorovatele **A**. Příklad je na následujícím obrázku 43, kde není znázorněna jen jedna barva se svými třemi atributy, ale všechny čtyři testované barvy se zaměřením na zobrazení pouze na jeden jejich atribut – zde na znázornění čistoty. Citlivost na čistotu je znázorněna v grafu tak, že byla-li barva posouvána do čistější oblasti, označila se znaménkem plus, a byla-li posouvána do kalnější oblasti, byla označena znaménkem minus. Například čistější modrá = „blue +“, kalnější modrá = „blue –“.



Obr. 43 Průběh zpřesňování posudku pozorovatele A během experimentu, zaměření na čistotu u všech testovaných barev - je patrný velký rozdíl mezi jednotlivými posudky

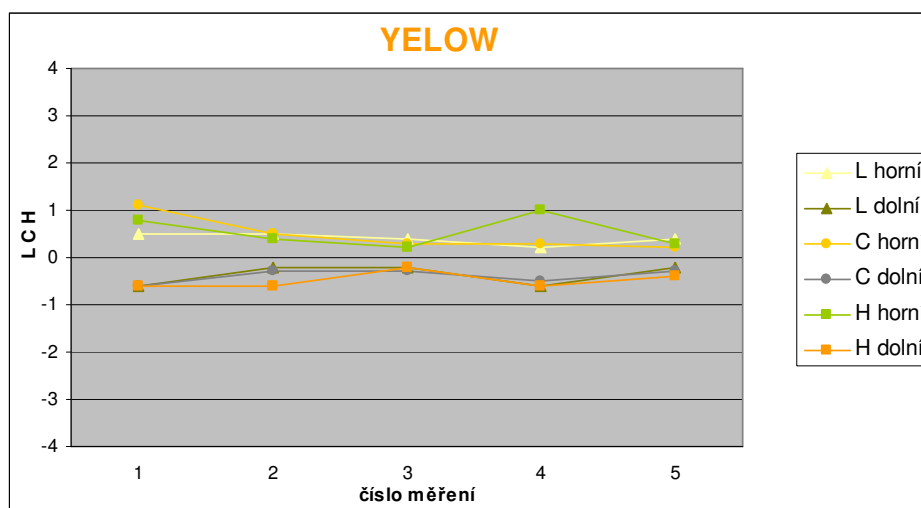
U dvou pozorovatelů byla zaznamenána téměř minimální zlepšení.

První je starší žena –pozorovatel D. Tento jev si u ní však lze vysvětlit tím, že pozorovatelka je zkušená koloristka, její oko je neustále cvičeno, je tedy již na takové úrovni vycvičenosti svého oka, kam se ostatní „necvičení“ pozorovatelé dostávají po cca čtyřech až pěti měřeních. Na obrázku 44 můžeme vidět průběh testování této ženy. Oproti některým ostatním pozorovatelům se může zdát, že její oči nepatří k nejcitlivějším ze skupiny, je to dáno jejím věkem, jinak se její hlášené hodnoty opakovaly.



Obr. 44 Průběh zpřesňování posudku pozorovatelky D – je patrný malý rozdíl mezi jednotlivými posudky.

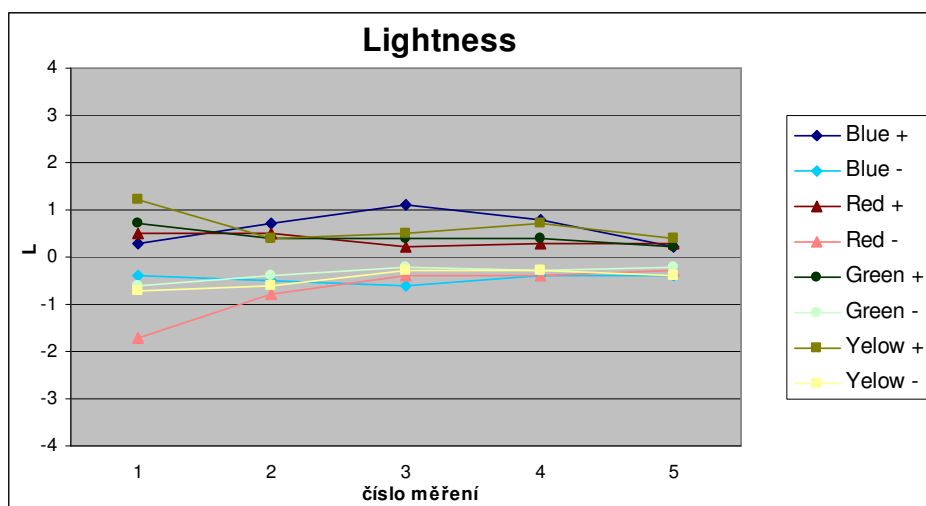
Druhý pozorovatel, u kterého bylo zlepšení minimální je žena (15 let), pozorovatelka E. V tomto věku jsou oči čerstvé, její citlivost je tedy vysoká. Menší zlepšení v průběhu experimentu je možné vysvětlit tím, že její oči jsou dostatečně mladé, a její psychický stav při testování mohl být ovlivněn. Výsledek můžeme sledovat například na obrázku 45.



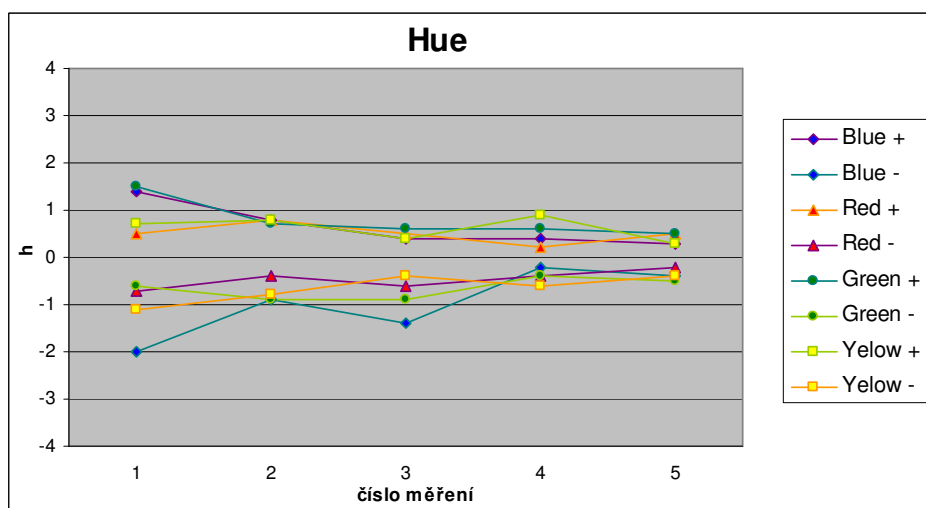
Obr. 45 Pozorovatelka E dosahovala minimálního zlepšení

Ze základních atribut barev byla celkově byla u všech pozorovatelů nejlépe rozeznávána světlost, kde bylo již od začátku dosahováno vysoké citlivosti. Tím je ale také způsobeno nejmenší absolutní zlepšení u citlivosti. U rozpoznávání změn barevných odstínů měněním tónu byla citlivost zpočátku horší než u světlosti. Absolutní zlepšení bylo větší. U čistoty, u které byla zpočátku citlivost nejhorší, nastalo během experimentu nejvýraznější zlepšení rozpoznávání změn (obrázek 43). Tento trend nejviditelněji reprezentuje pozorovatel A, který je zobrazen na následujících třech obrázcích 46-48, kde první graf představuje atribut světlosti (graf s názvem Lightness), druhý představuje tón (graf s názvem Hue), a třetí zobrazuje čistotu (graf z názvem Chroma).

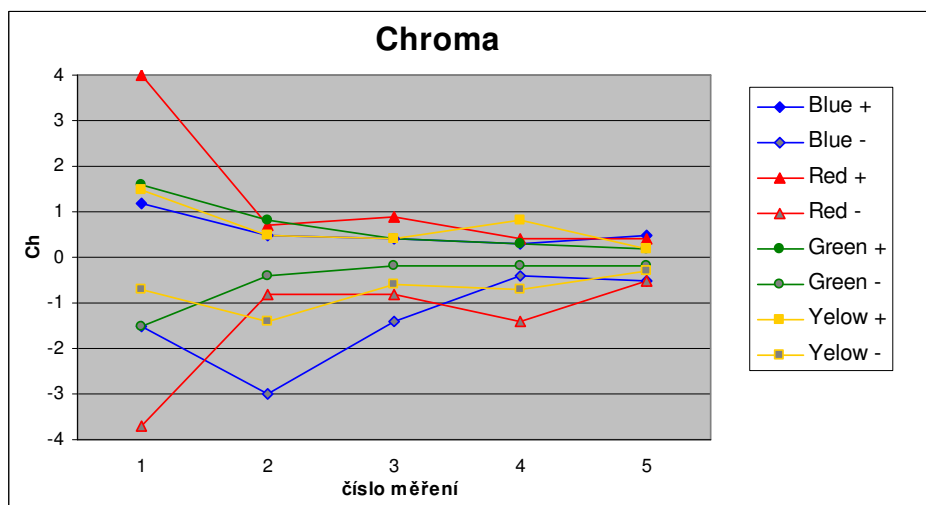




Obr. 46 Graf znázorňující průběh posudku pozorovatele A, světlost (lightness)



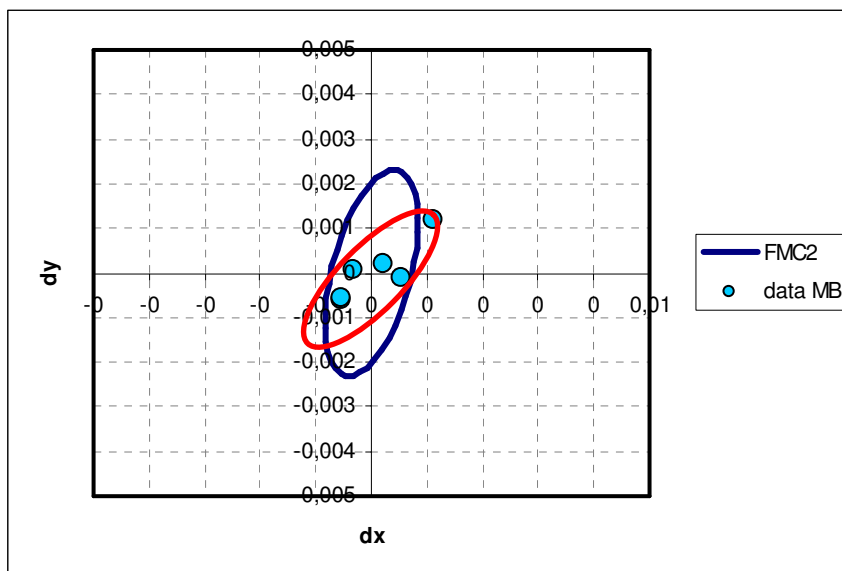
Obr. 47 Graf znázorňující průběh posudku pozorovatele A, odstín (hue)



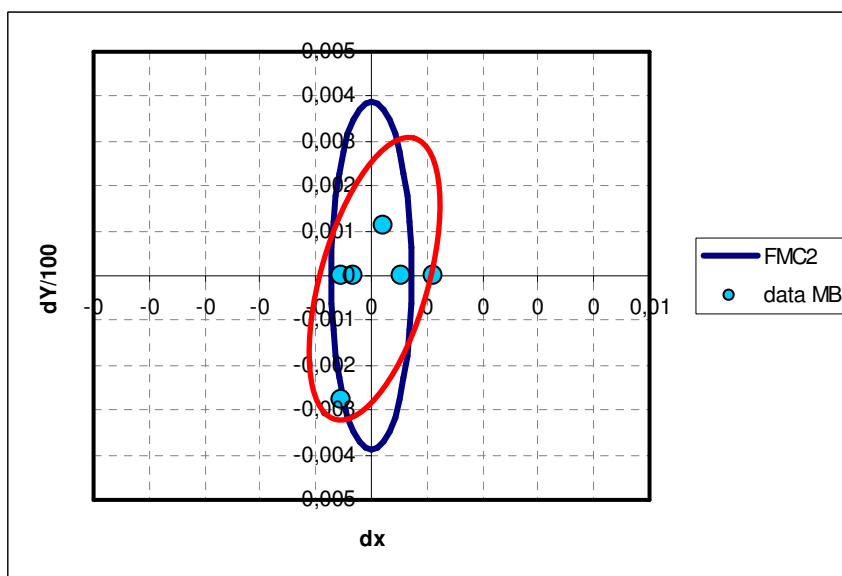
Obr. 48 Graf znázorňující průběh posudku pozorovatele A, čistotu (chroma)

### 7.1.2. MacAdamova hraniční citlivost

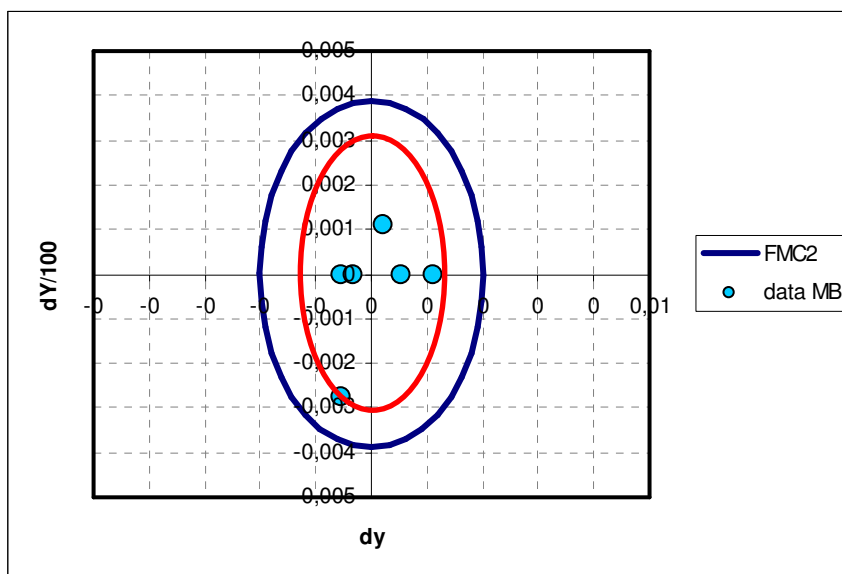
Následující grafy zobrazují MacAdamovu hraniční citlivost (FMC2 – modrá elipsa) vůči barevným rozdílům a průmět diskriminačního elipsoidu (červená elipsa)



Obr. 49 Grafy znázorňující MacAdamovu hraniční citlivost (FMC2) vůči barevným rozdílům a průmět diskriminačního elipsoidu (červená elipsa) pozorovatelky **B** pro modrý pár bez dělicí linky na chromatické ploše kolorimetrické soustavy CIE Yxy



Obr. 50 Grafy znázorňující MacAdamovu hraniční citlivost (FMC2) vůči barevným rozdílům a průmět diskriminačního elipsoidu (červená elipsa) pozorovatelky **B** pro modrý pár bez dělicí linky na Yx ploše kolorimetrické soustavy CIE Yxy (pro větší názornost jsou rozdílové hodnoty jasové složky Y 100 zmenšeny)



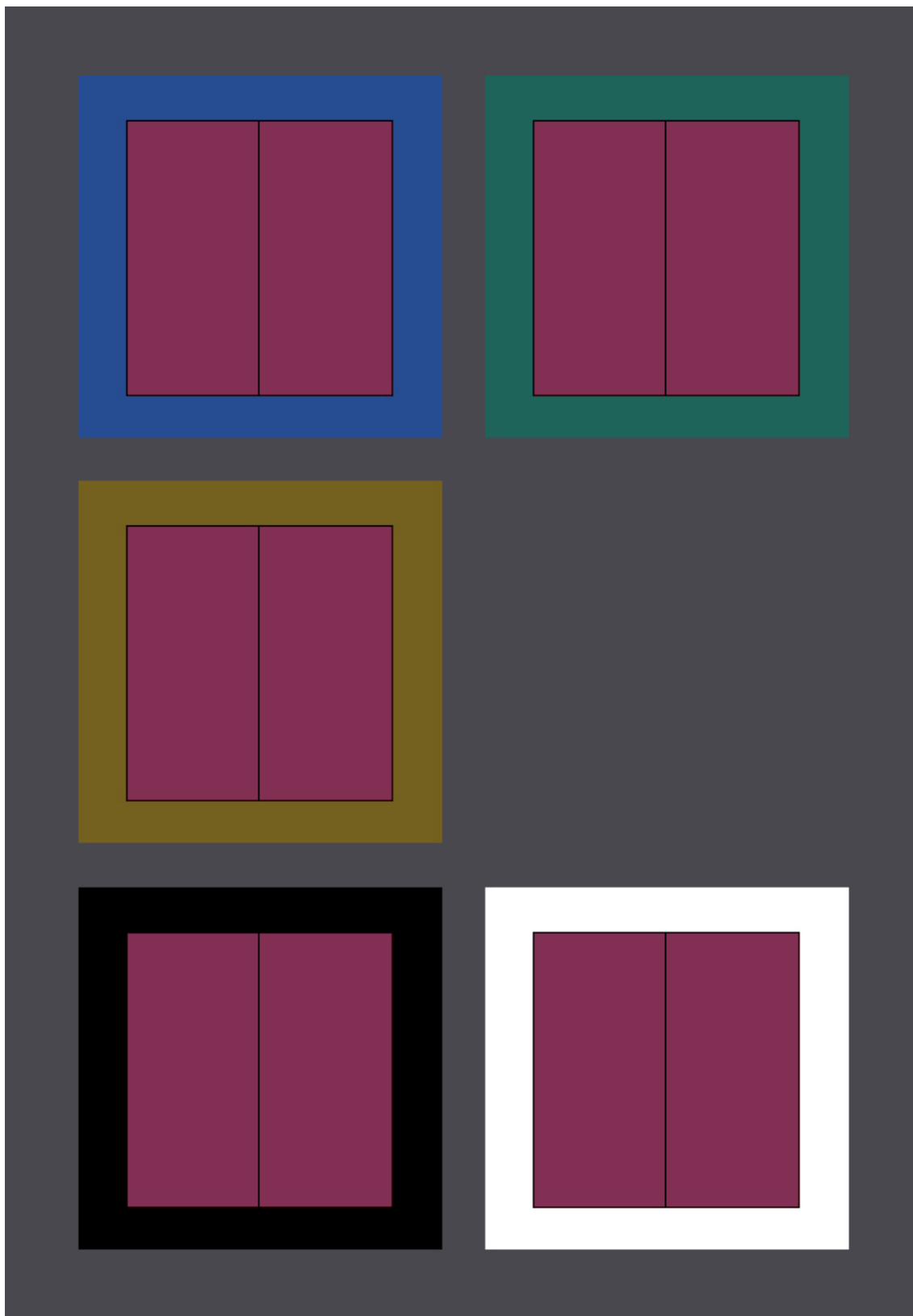
*Obr. 51 Grafy znázorňující MacAdamovu hraniční citlivost (FMC2) vůči barevným rozdílům a průmět diskriminačního elipsoidu (červená elipsa) pozorovatelky B pro modrý pár bez dělicí linky na Yy ploše kolorimetrické soustavy CIE Yxy (pro větší názornost jsou rozdílové hodnoty jasové složky Y 100 zmenšeny)*

Jak dokumentují výše uvedené grafy na obrázcích 49-51 velikost a tvar vypočteného diskriminačního elipsoidu je blízký MacAdamovu pozorovateli, který je považován za představitele hraniční citlivosti člověka vůči vnímání barevných rozdílů, jehož matematickou interpretací je rovnice označovaná jako FMC2 [2]. Malé rozdíly v natočení a velikosti vypočteného diskriminačního elipsoidu lze přičíst na vrub relativně malému počtu naměřených dat k jednomu barevnému centru. Získaný výsledek je nicméně možno považovat za potvrzení správnosti provedeného experimentu.

## 7.2. Testování vlivů pozadí na vjem barevných rozdílů

Testování probíhalo podobně jako testování citlivosti skupiny pozorovatelů, rozdíl byl v tom, že k testovacím tvarům bylo přidáno barevné pozadí. U každé ze čtyř základních testovacích barev byly vystřídány pozadí stejných základních tří barev (mimo shodné barvy), a navíc bylo přidáno pozadí bílé a černé. Například modrá barva byla testována na pozadí červeném, zeleném, žlutém, černém a bílém, modrá na modré se netestovala. Barva červená byla testována na pozadí modrém, zeleném, žlutém, černém a bílém, červená na červené nebyla testována. A tak dále u všech čtyř

základních testovacích barev. Ukázku spořádání vzorků – testovacího páru na různých pozadích dokumentuje pro červený pár na obrázku 52.



*Obr. 52 Ukázka uspořádání zorného pole pro červený pár při studiu vlivu pozadí na hraniční citlivost pozorovatelů vůči barevným rozdílům*

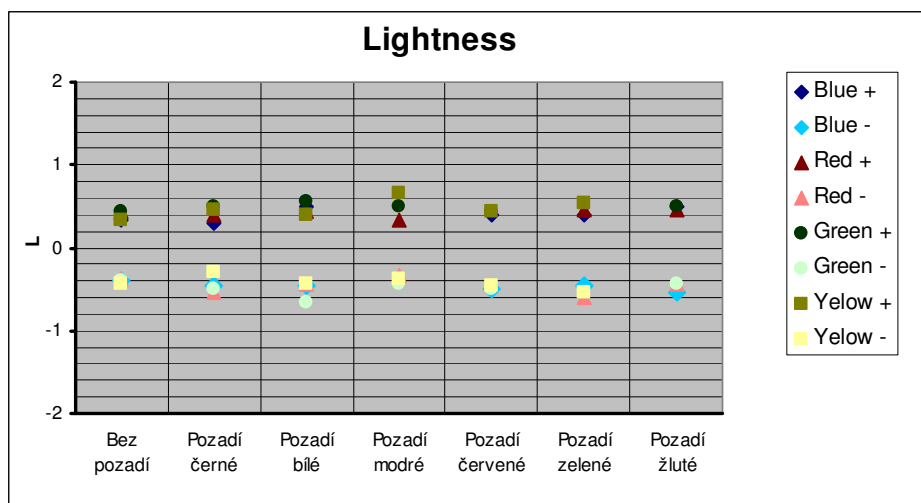
Při testování vlivů pozadí na vjem barevných rozdílů byli pro test použiti pozorovatel **A** a pozorovatelka **B**. Obě osoby mají sedavé celodenní zaměstnání před obrazovkou počítače. Oba byli testováni pětkrát na všech pěti barevných pozadích, kdy byla k obrysu testovacích obdélníků připojena tenká černá linie, a též byli oba testováni pětkrát na všech šesti barevných pozadích, kdy obrys testovacího tvaru zůstal čistý a nezměněný, přímo doléhající ke svému okolí, které se skládalo z barevného pozadí a druhého barevně porovnávaného tvaru.

### 7.2.1. Porovnání naměřených výsledků

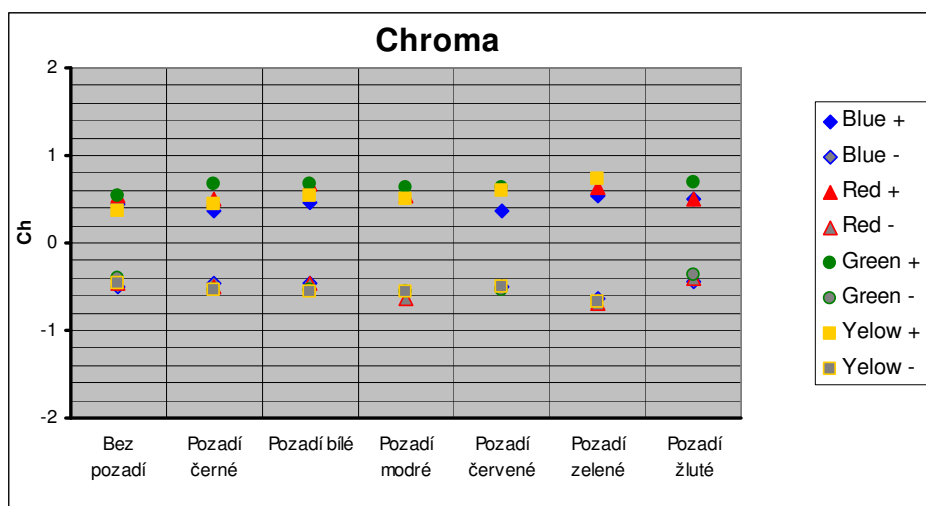
Při srovnávání výsledků grafů dvou testovaných osob **A** a **B**, byl zjištěn rozdíl v citlivosti vnímání barevných rozdílů u testovacího obrazce s linií a bez linie.

U barevného srovnání párů s liniemi a barevným pozadím byla citlivost na zkoumané atributy barvy vcelku vyrovnaná, dalo by se říci, že se podobala výsledkům z předchozího experimentu. V grafech na obrázcích 53, 54 a 55 je patrné, že citlivost atributů barev jsou na obrázcích s linií vyrovnané.

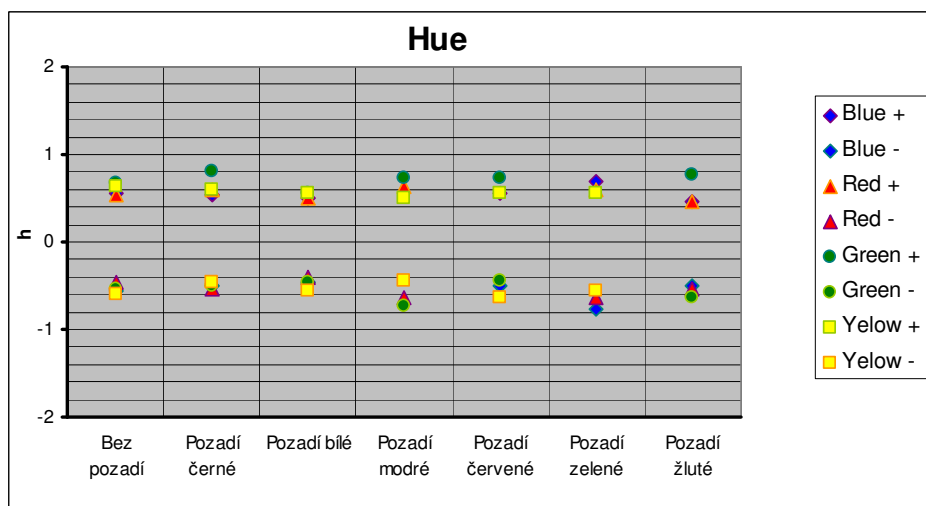
Z porovnání pozadí v každém z těchto tří grafů je zřejmé, že vliv pozadí není nijak výrazný.



Obr. 53 Zobrazení citlivosti oka na změnu světlosti v obrazci s linií u pozorovatelky **B**

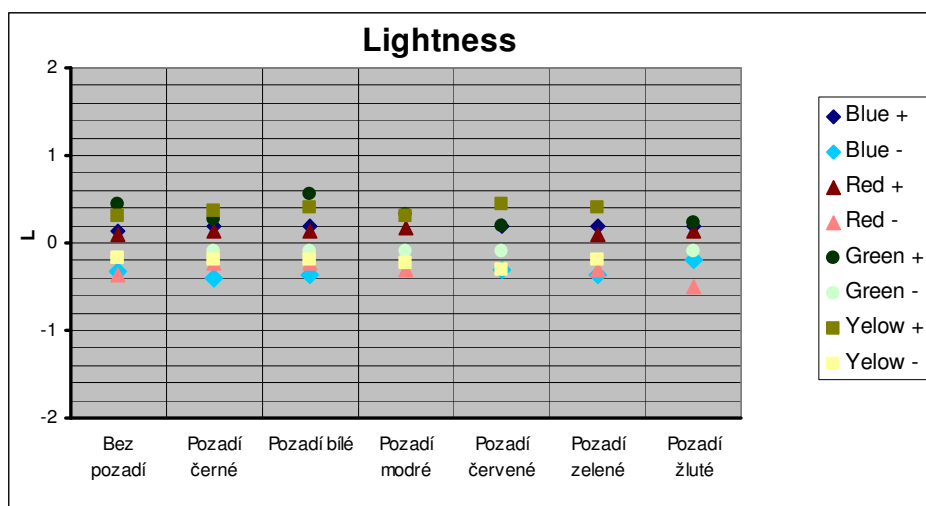


Obr. 54 Zobrazení citlivosti oka na změnu čistoty v obrazci s linií u pozorovatelky **B**

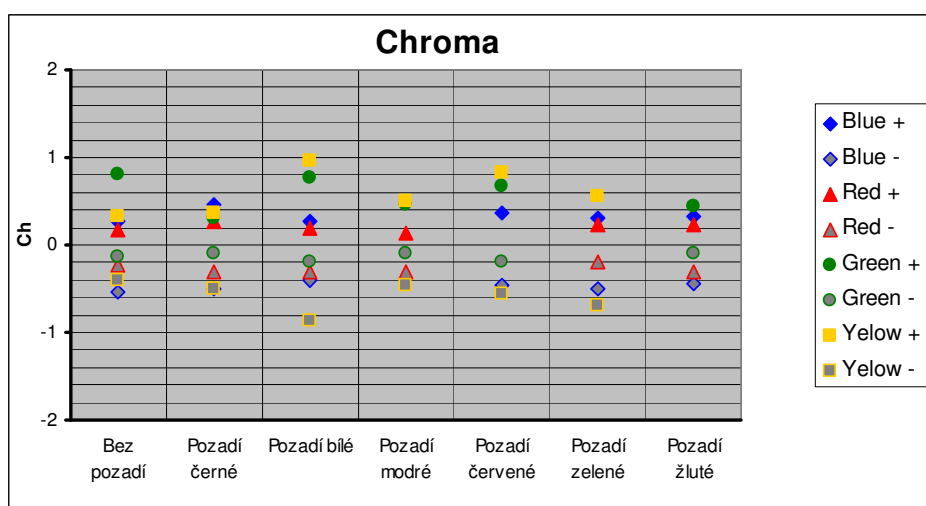


Obr. 55 Zobrazení citlivosti oka na změnu odstínu v obrazci s linií u pozorovatelky **B**

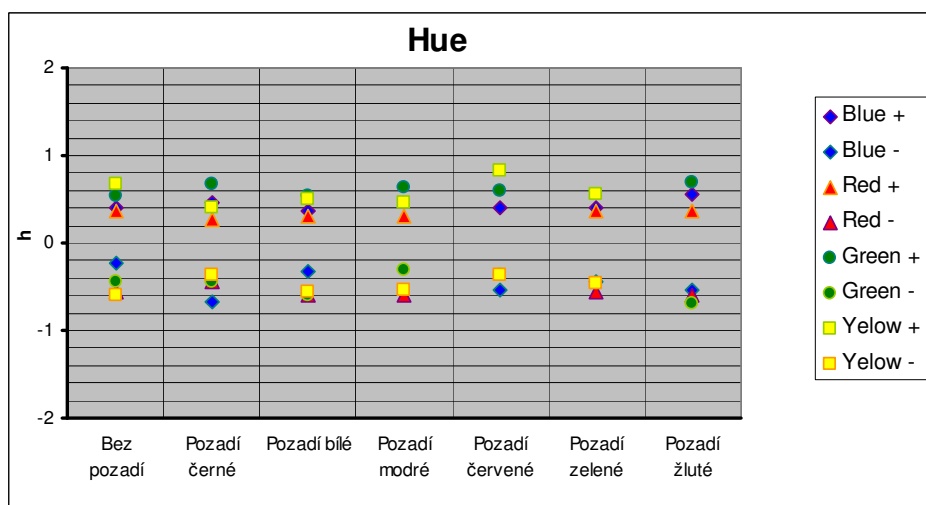
U srovnání párů barev bez linií je oko pozorovatelů nejcitlivější na světlost. Pozorovatelé byli, na rozdíl od předchozího experimentu, citlivější na čistotu více než na tón, nebo byli hodnoty čistoty a tónu srovnatelné – obrázky 56,57,58.



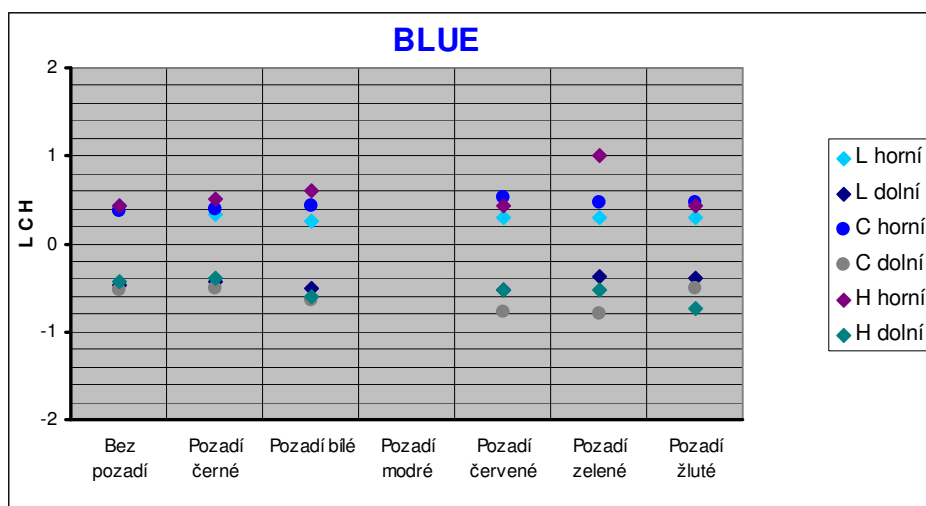
Obr. 56 Zobrazení citlivosti na změnu světlosti v obrazci bez linií u pozorovatelky **B**



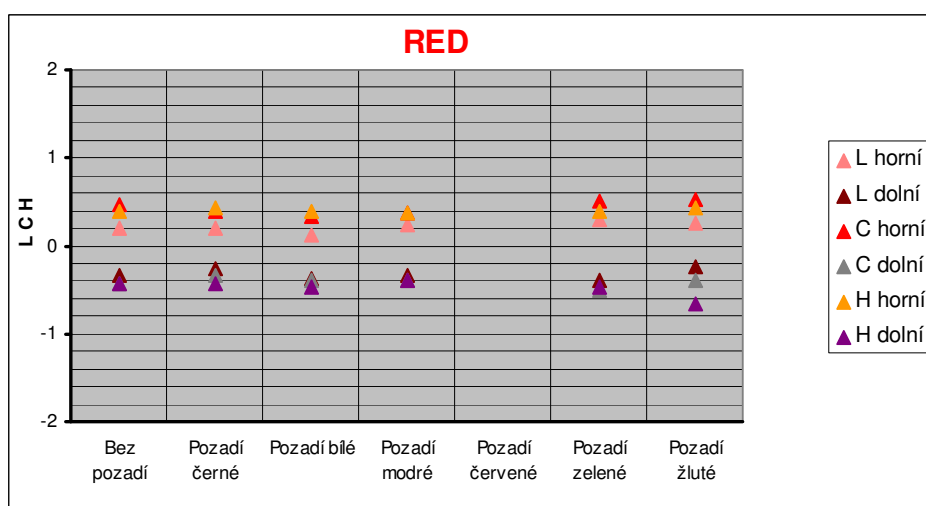
Obr. 57 Zobrazení citlivosti na změnu čistoty v obrazci bez linií u pozorovatelky **B**



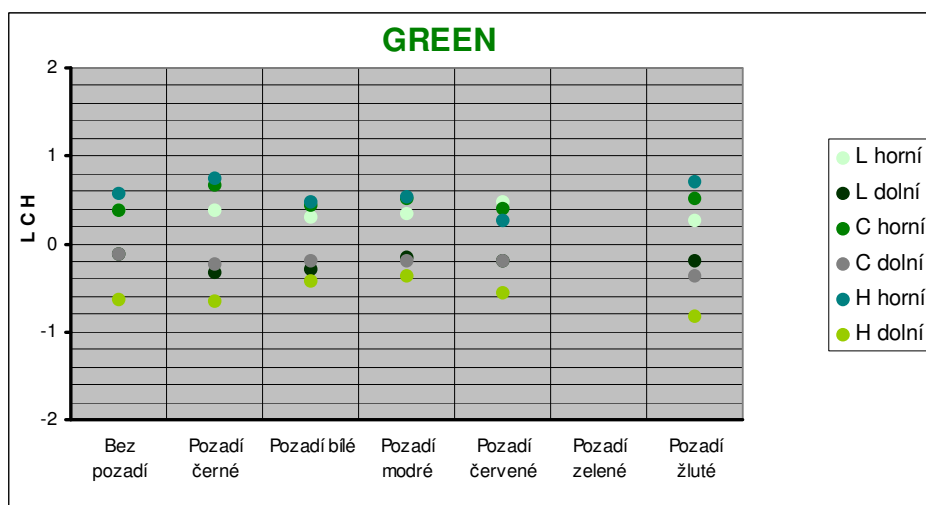
Obr. 58 Zobrazení citlivosti na změnu odstínu v obrazci bez linií u pozorovatelky **B**



Obr. 59 Ukázka vlivu pozadí pro modrý pár a pozorovatele A

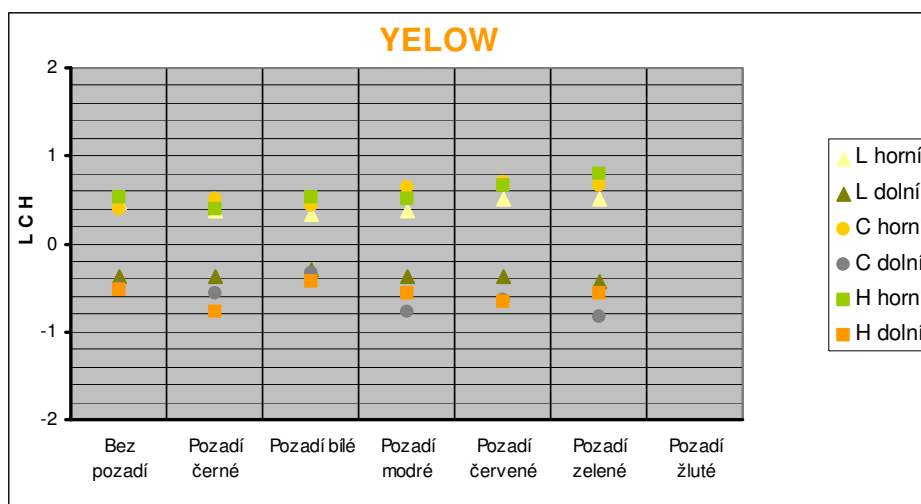


Obr. 60 Ukázka vlivu pozadí pro červený pár a pozorovatele A



Obr. 61 Ukázka vlivu pozadí pro zelený pár a pozorovatele A





Obr. 62 Ukázka vlivu pozadí pro zelený pár a pozorovatele A

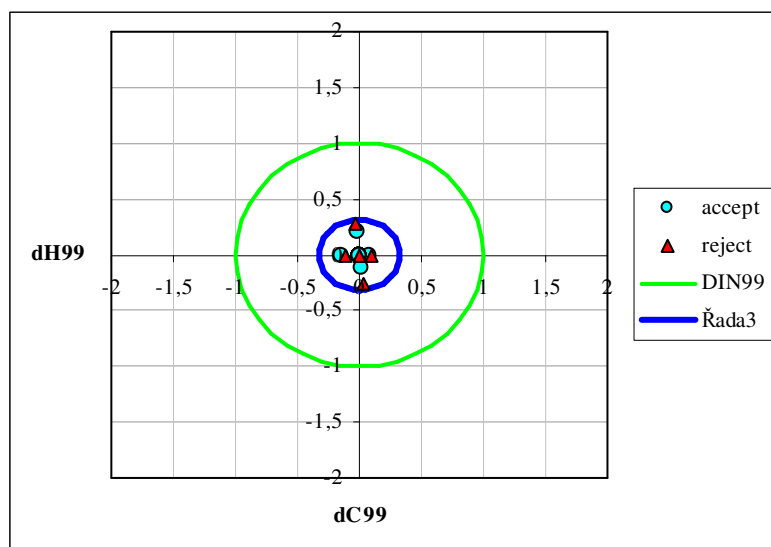
Obr. 59-62 dokumentují skutečnost, že v případě vnímání barevných rozdílů mezi dvěma vzorky barevného páru nedochází k významnějšímu ovlivnění hraniční citlivosti pozorovatele blízkým okolím, tj. barevným pozadím o relativně malé velikosti. Tato skutečnost je zřejmě ovlivněna schopností pozorovatelů zaměřit se na samotný barevný pár, čímž je rušivý vliv pozadí eliminován. Grafy pro jednotlivé atributy barvy pozorovatele A a barevné páry pozorovatelky B jsou uvedeny v příloze této diplomové práce.

U mladšího pozorovatele – muže, graf ukazuje, že jeho oči dokázaly u testování s linií částečně překonat ztížení testování přidání linie, a graf vykazuje lehce podobný trend jako u testování bez černé linie.

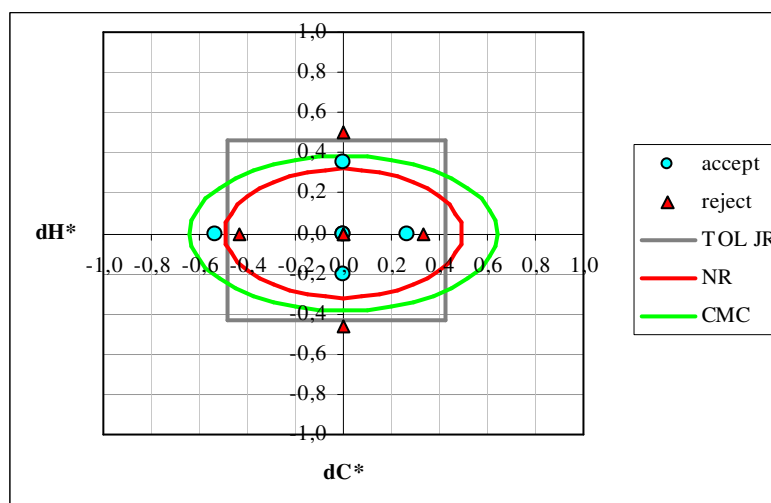
U staršího pozorovatele – ženy, bylo pozorováno významné ovlivnění únavou, která měla určitě vliv na číselné výsledky. Jako opatření proti projevům únavy bylo měněno pořadí, ve kterém byla jednotlivá pozadí testována. Začínalo-li se jeden den bílým pozadím, a končilo zeleným, další testování začínalo zeleným pozadím a končilo bílým. Tímto se částečně eliminovaly měření ovlivněná únavou.

### 7.2.2. Porovnání experimentálních dat a rovnic pro výpočet barevných odchylek

Jedním z úkolů této práce bylo porovnání naměřených výsledků s rovnicemi pro výpočet barevných rozdílů. Jak dokumentují obrázky 63 a 64, rovnice pro výpočty barevných rozdílů jsou nastaveny na tzv. akceptovatelné barevné rozdíly, které představují větší toleranci než hraniční citlivost lidského oka vůči barevným rozdílům. Zjednodušeně lze říci, že hraniční mez citlivosti je zhruba 4x menší než jsou průmyslové tolerance pro barevné rozdíly.

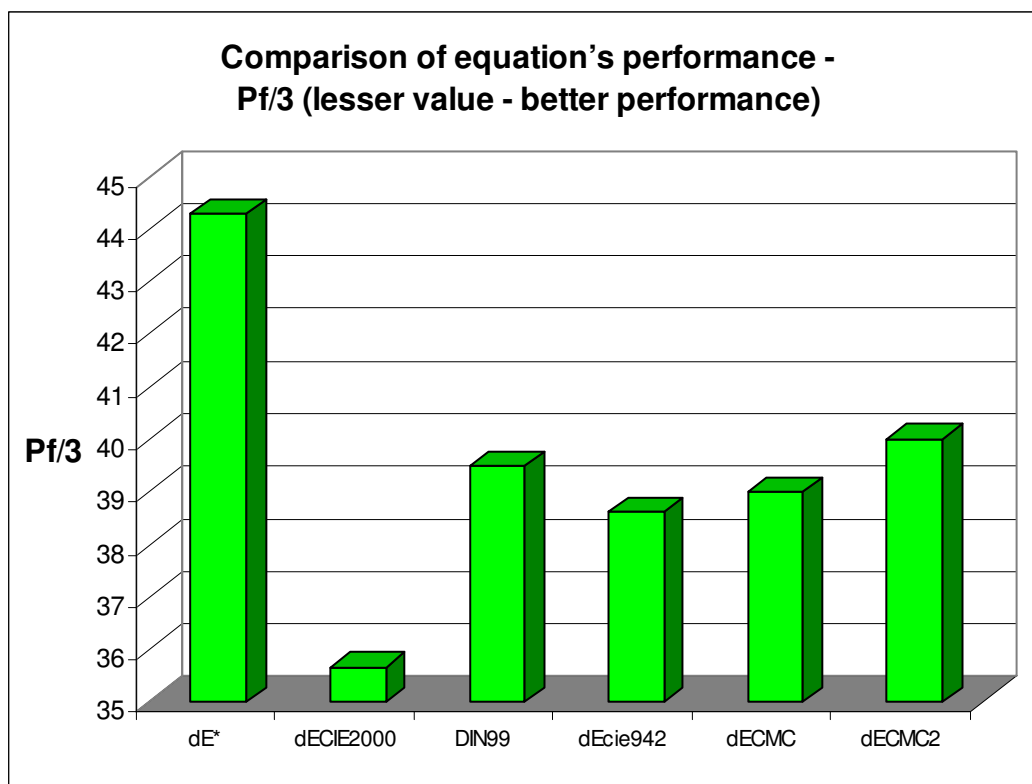


Obr. 63 Porovnání naměřených dat pro modrý pár a pozorovatele A ve srovnání s neadjustovanou a adjustovanou rovnicí DIN99



Obr. 64 Porovnání naměřených dat pro modrý pár a pozorovatele A ve srovnání s adjustovanou rovnicí CMC

Podobně i v případě rovnice CMC bylo nutno provést adjustaci této rovnice (čtyřnásobné zmenšení), aby tato rovnice odpovídala hraniční citlivosti člověka vůči barevným rozdílům.



*Obr. 65 Porovnání predikční účinnosti testovaných rovnic pro výpočty barevných rozdílů (čím nižší hodnota tím vyšší účinnost)*

Jak již bylo uvedeno jedním z úkolů bylo porovnat nejpoužívanější rovnice pro výpočty barevných rozdílů s experimentálně zjištěnými daty. Obrázek 65 dokumentuje skutečnost, že nejlepšího výsledku dosáhl nejnovější standard Mezinárodní Komise pro Osvětlování CIE2000. Naopak nejhorší výsledek byl zjištěn pro kolorimetrickou soustavu CIELAB.

Lze tedy říci, že rovnice pro výpočty barevných rozdílů představují významné zlepšení predikční účinnosti barevných rozdílů ve srovnání s kolorimetrickou soustavou CIELAB a že technika „adjustace“ těchto rovnic je použitelná pro nastavení tolerančních mezí v případech, kdy je vyžadována jako rozhodčí hodnota hraniční citlivost vůči barevným rozdílům.

## 8. Studie dalšího postupu

Po zhodnocení výsledků experimentu navrhuji jako další postup případných dalších prací na této problematice:

- *lidský faktor* – Proběhlý experiment hodnotí vliv barevného pozadí na vnímání barevných odstínů v u širokého věkového průřezu populace. To dává komplexní přehled o dané problematice. V následném měření doporučuji vybrat pozorovatele dle kapitoly 3.2.2. bod 6, doporučuji zohlednit rovněž bod 5 kapitoly 3.2.2. Tím by mělo být dosaženo větší reprodukovatelnosti výsledků. Taktéž doporučuji měření provádět alespoň s 10 pozorovateli. V případě vyhodnocování vlivu barevného pozadí na vjem barevných odstínů celém věkovém průřezu obyvatelstva doporučuji vytvořit skupiny pozorovatelů odstupňovaných po 5-ti letech. Každá skupina by měla mít opět alespoň 10 pozorovatelů.
- *vlastní průběh měření* – V případě vlastního měření doporučuji rozšířit počet tvarů (obrázek 25). Doporučuji taktéž experiment provádět nejen na plochách bez textury, ale použít barvu s reálnou texturou – např. textury textilií a dalších povrchů, které se vyskytují všude kolem nás. Pro zvýšení komplexnosti výsledků, doporučuji neomezovat následná měření pouze na barvy použité v tomto experimentu, ale rozšířit měření na další škálu barev.
- *pozorovatelé s vadou barvocitu* – Výsledky hodnocení jednotlivých pozorovatelů byly relativně málo rozdílné. Tato skutečnost byla ovlivněna jednak malým počtem účastníků experimentu, jak je uvedeno výše, jednak malými rozdíly v barvocitu účastníků (4 byli s vynikajícím rozlišením a jedna hodnotitelka s průměrným rozlišením blízkým skupině s vynikajícím rozlišením). Pro studium mechanismů vnímání barev mají velký význam hodnotitelé s defekty vnímání barev, proto se mi jeví jako vhodné rozšířit případnou další studii i o tuto skupinu hodnotitelů.

## 9. Závěr

Jedním z nejvýznamnějších aspektů kontroly kvality výrobních procesů je udržování konstantnosti barvy výrobku. Udržení barevné specifikace určitého výrobku je tradičně dosahováno vizuálním srovnáváním s vhodnými standardy zajišťovanými výrobcem. Rozsah barevných rozdílů, který je přípustný u nějakého výrobku, závisí na mnoha faktorech, např. reprodukovatelnost barvicího procesu, potiskování atd., nákladech na přesné nastavení barvy ve vztahu k nákladům na samotný výrobek, velikosti kolísání barevného vzhledu, které zákazník bude tolerovat.

Až do konce padesátých let byla v průmyslu kontrola kvality odstínu prováděna téměř výhradně zkušenými odborníky - koloristy. Rozhodnutí o tom, zda určitá partie vyhovuje, či nevyhovuje, záviselo na vizuálním posudku barevného rozdílu ve vztahu k toleranci povolené pro příslušný výrobek. Tento typ posudků, který se ještě denně provádí v řadě průmyslových odvětví, včetně textilního, vyžaduje značné zkušenosti. A ani po vyškolení není člověk - pozorovatel úplně spolehlivý ve svém posudku akceptovatelných a neakceptovatelných barevných diferencí. Stává se nejen, že se různí pozorovatelé neshodují v tom, zda je barevná difference výrobku akceptovatelná, ale že se i jeden jediný pozorovatel ve svých posudcích liší.

S příchodem měřicí techniky pro měření barevnosti se začaly vyjadřovat barevné difference objektivně. Velmi brzy se však projevíly určité komplikace související s charakterem a vlastnostmi barevného prostoru CIE XYZ. Systém CIE XYZ poskytuje předpověď, zda dva dané barevné odstíny s rozdílnou spektrální charakteristikou budou za určitých podmínek vnímány jako shodné. Na druhé straně systém CIE XYZ neumožňuje jednoduchou definici veličiny popisující barevnou difference, kterou může pozorovatel vnímat mezi dvěma odstíny. Vizuálně vnímaná barevná difference velmi kolísá s podmínkami pozorování a druhem prezentovaného podnětu. Velikost vzorku, textura, úroveň osvětlení, pozadí a prostorová distribuce podnětu ovlivňují pozorovatelův posudek. Postupy, jak předpovědět pozorovatelův posudek barevné difference, jsou vedeny koncepcí, že vnímaná barva může být prezentována jako bod v třírozměrném prostoru XYZ. V nejjednodušším případě si můžeme představit barevnou difference jako lineární vzdálenost mezi těmito body. Bohužel, je taková barevná difference v prostoru CIE XYZ nepoužitelná, protože CIE těleso barev je vizuálně nestejnoměrně odstupňované, tj. páry vzorků téže lineární vzdálenosti v různých částech

tělesa barev představují odlišně vizuálně vnímané velikosti barevné difference / 2 /. Výzkumné práce Wrighta, MacAdama a dalších ukázaly, že v tělese CIE XYZ, resp. CIELAB může být vizuální citlivost k barevným diferencím reprezentována jako elipsoidy, jejichž velikost v různých oblastech významně kolísá.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, zda barevné pozadí významně ovlivňuje posudky barevných rozdílů. K tomuto účelu byly použity virtuální vzorky textilií bez simulované textury textile. Získané výsledky ukázaly, že v případě neškolených pozorovatelů dochází k procesu učení, jak barevný rozdíl identifikovat. Toto zjištění koresponduje se známou koloristickou zkušeností, že člověk není schopen dobrého odhadu barvicí receptury dříve než po alespoň dvou letech učení.

Za velmi důležitý výsledek této práce lze považovat zjištění, že pozorovatelé jsou schopni do určité míry eliminovat vliv barevného pozadí při posuzování barevných rozdílů u vzorků, které jsou v intimním kontaktu. Tento výsledek je ve zdánlivém rozporu s jevy barevného vzhledu, které jsou diskutovány v teoretické části této práce. Je nutno si ale uvědomit, že uspořádání vzorků v experimentu je rozdílné od uspořádání vzorků v případech jevů barevného vzhledu (chromatický simultánní kontrast, barevná asimilace apod.) Příklady uvedené v teoretické části dokumentují vliv mezery (gap effect) na vnímání barevných rozdílů. Lze tedy uvažovat o nutnosti rozšíření případného dalšího experimentu i na vliv mezery v případě průmyslových posudků barevných rozdílů, kdy nelze z technických důvodů zajistit intimní kontakt vzorků.

A v neposlední řadě je nutno zmínit i zjištění, že rovnice pro výpočty barevných rozdílů lze pomocí „adjustace“ nastavit tak, aby jejich tolerančních meze byly použitelné pro objektivní posudky barevných rozdílů i v případech, kdy je vyžadována jako rozhodčí hodnota hraniční citlivost vůči barevným rozdílům. Tento fakt má význam například pro automobilový průmysl, kde dochází ke „skládání“ dílů od různých výrobců, takže například nárazník je vyroben jinde než kapota. Přičemž zákazník by barevný rozdíl neměl poznat.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] Veličkovskij, B.M., Zinčenko, V.P., Lurija, A.R.: Psychologie vnímání, SPN Praha 1976
- [2].Vik, M.: Měření Barevnosti a Vzhledu – Barevné Odchylky, Skriptum TU Liberec 2004
- [3] <https://biofyzika.lfp.cuni.cz/file.php/1/referaty/15-fotometrie.ppt>
- [4] [www.physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt\\_304.pdf](http://www.physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_304.pdf)
- [5] [mvt.ic.cz/dva/zfm-kvo/zfm-kvo-09.pdf](http://mvt.ic.cz/dva/zfm-kvo/zfm-kvo-09.pdf)
- [6] Daniel Hrivňák: Vlnění a optika ; PF Ostravské univerzity, OSTRAVA 2004
- [7] Vik, M.: Základy Měření Barevnosti, Skriptum TU Liberec 1995
- [8] [www.ueen.feec.vutbr.cz](http://www.ueen.feec.vutbr.cz)
- [9] M.E.Chevreul, Principles of Harmony and Contrast of Colours, 1860
- [10] Kuehni, R. : Color Spaces and Its Divisions, John Wiley & Sons Inc., 2003
- [11] Billmeyer, F. W. Jr., Saltzman, M., Berns R. : Principles of Color Technology, III. Ed. , John Wiley & Sons Inc., 2000
- [12] Staněk, J.: Vizuální fotometrie a fyziologická optika, SNTL Praha 1980